



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de Génie civil

INFLUENCE DE LA GRANULOMÉTRIE SUR LA VITESSE DES ONDES DE CISAILLEMENT DES SOLS GRANULAIRES

Mémoire de maîtrise en sciences appliquées

Spécialité : Génie Civil

Composition du jury

Ammar Yahia, Université de Sherbrooke, rapporteur

Mourad Karray, Université de Sherbrooke, directeur de recherche

Mounir Bouassida, Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tunis

Harlette T. TCHABAT

Sherbrooke (Québec), CANADA

Juin 2011

IV-2168



**Library and Archives
Canada**

**Published Heritage
Branch**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque et
Archives Canada**

**Direction du
Patrimoine de l'édition**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-83710-8

Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-83710-8

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

RÉSUMÉ

La détermination de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement (V_s) dans un sol est fondamentale dans tous les problèmes en dynamique des sols. Plusieurs techniques permettent la mesure de V_s dans les sols. En effet, le paramètre V_s permet la caractérisation et l'évaluation du potentiel de liquéfaction des sols granulaires. Cependant, indépendamment de la technique de mesures utilisées, plusieurs valeurs de V_s peuvent être obtenues. Cette diversification peut se justifier par plusieurs facteurs, notamment la granulométrie. D'où cette étude qui porte sur l'influence de la granulométrie sur la vitesse des ondes de cisaillement des sols granulaires.

Dans ce mémoire de maîtrise, l'effet des éléments caractéristiques des sols granulaires (D_{50} , e , C_u , σ_m) sur la vitesse des ondes de cisaillement est étudié. Quatre types de sols granulaires ayant des propriétés granulométriques différentes sont considérés. Il s'agit de :

- Le sable d'Ottawa (C-190) ($D_{50} = 0,37$ mm et $C_u = 1,96$),
- Le sable de Milby qui est un sable très fin ($D_{50} = 0,247$ mm et $C_u = 3,2$),
- Le sable Eastman ($D_{50} = 0,6$ mm et $C_u = 11,05$) et
- Le Till Eastman ($D_{50} = 0,1$ mm et $C_u = 22$).

Les essais en laboratoire ont été réalisés sur une cellule oedométrique équipée d'un dispositif d'anneau piézoélectrique qui permet de déterminer à la fois la valeur le module oedométrique (E_{oed}) à partir de la cellule et la mesure de V_s à partir de l'essai ring actuator développé à l'université de Sherbrooke.

Il ressort de cette étude que la vitesse des ondes de cisaillement augmente avec l'augmentation du D_{50} . De plus, cette étude révèle qu'il existe une corrélation directe entre le module oedométrique et le module de cisaillement G_{max} . Cette corrélation peut se traduire par une fonction de la forme de la forme $E_{oed} / G_{max} = f(\sigma)$.

Mots clés :

Sols granulaires, vitesses d'ondes de cisaillement(V_s), anneaux piézoélectriques, éléments caractéristiques des sols, module oedométrique et module de cisaillement.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail de recherche n'a pas été chose facile, car elle a nécessité plusieurs qualités telles que, l'intelligence, l'ardeur, la patience et l'encouragement. Ainsi, ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans la contribution de plusieurs personnes qui de prêt ou de loin m'ont permises de cultiver ces vertus qui me seront imprégnés pour la vie.

Qu'il me soit donc permis de remercier, le Seigneur Dieu tout puissant qui m'a donné l'intelligence, la sagesse et la persévérance pour l'aboutissement de ce travail.

Ma reconnaissance va à l'endroit du professeur Mourrad Karray, qui a bien voulu conduire ce mémoire de maîtrise et qui m'a accompagné durant ce long processus.

Je remercie tout le corps professoral de l'UdeS pour l'encadrement et aussi les techniciens du département qui font un travail remarquable.

Un merci particulier à mes parents pour leurs soutiens financiers et leurs encouragements.

Je ne saurais finir sans dire un gros merci à tous mes amis qui ont su agrémenter ses longues années d'études.

Merci à vous tous!!!

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.2 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE ET CONTRIBUTIONS	2
CHAPITRE 2: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	4
2.1 INTRODUCTION	4
2.2 GÉNÉRALITÉS SUR LA THÉORIE DE PROPAGATION DES ONDES DANS LES SOLS	4
2.2.1 <i>Les ondes de volume</i>	5
2.2.2 <i>Les ondes de surface</i>	7
2.3 TECHNIQUE DE MESURE DE LA VITESSE DES ONDES DE CISAILEMENT DANS LES SOLS.	8
2.3.1 <i>Les méthodes in situ</i>	9
2.3.2 <i>Les méthodes utilisées en laboratoire</i>	13
2.3.3 <i>Les paramètres à prendre en compte dans la détermination de V_s au moyen des bilames</i>	19
2.4 INTERPRÉTATION DES SIGNAUX : MÉTHODES ET SOURCES D'ERREUR	20
2.4.1 <i>Les méthodes</i>	20
2.4.2 <i>Sources d'erreur</i>	23
2.5 UTILISATION DE LA VITESSE DES ONDES DE CISAILEMENT DES SOLS GRANULAIRES	26
2.5.1 <i>Utilisation de V_s des sols granulaires (application)</i>	26
2.5.2 <i>Autre utilisation de V_s : Le phénomène de liquéfaction</i>	26
2.5.3 <i>Paramètres qui influent sur la vitesse des ondes de cisaillement des sols granulaires</i>	27
2.5.4 <i>Corrélations empiriques entre V_s (ou G_{max}) et les paramètres caractéristiques du sol</i>	30
CHAPITRE 3 : DESCRIPTION DU MONTAGE ET DES ÉQUIPEMENTS	36
3.1 GÉNÉRALITÉS	36
3.2 DESCRIPTION GÉNÉRALE DU MONTAGE	37
3.3 LE DISPOSITIF DES ANNEAUX- PIÉZO-ÉLECTRIQUES	38
3.3.1 <i>Description</i>	38
3.3.2 <i>Avantages des anneaux piézo-électriques</i>	39
3.4 LA CELLULE OEDOMÉTRIQUE	39
3.5 TYPE D'ONDE ÉMISE	41
3.6 LES POINTS DE MESURES	42
3.7 LE MODÈLE UTILISÉ POUR LE TRAITEMENT DES SIGNAUX	43
3.8 DÉPHASAGE INDUIT PAR LES CAPTEURS	45
3.9 INTERPRÉTATION DES SIGNAUX	46
CHAPITRE 4 : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET DESCRIPTION DES MATÉRIAUX	48

4.1	INTRODUCTION	48
4.2	PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE	49
4.2.1	<i>Essai oedométrique</i>	49
4.2.2	<i>Ring-actuator ou anneaux piézoélectriques</i>	50
4.3	DESCRIPTION DES MATÉRIAUX UTILISÉS	51
4.3.1	<i>Le sable d'Ottawa</i>	51
4.3.2	<i>Le sable Milby</i>	52
4.3.3	<i>Le sable d'Eastman (EM)</i>	53
4.3.4	<i>Le Till d'Eastman (EM)</i>	54
4.3.5	<i>Récapitulatif des matériaux utilisés</i>	56
	CHAPITRE 5 : PRÉSENTATION, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	57
5.1	INTRODUCTION	57
5.2	PRÉSENTATION ET ANALYSES DES RÉSULTATS	59
5.2.1	<i>Sable d'Ottawa</i>	59
5.2.2	<i>Sable de Milby</i>	70
5.2.3	<i>Sable d'Eastman</i>	77
5.2.4	<i>Till Eastman lâche</i>	84
5.2.5	<i>Variation de la vitesse en fonction du diamètre D_{50}</i>	87
5.3	CONCLUSIONS GÉNÉRALES	88
	CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS	89
	LISTES DES RÉFÉRENCES	90
	ANNEXES	94

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Illustration des différentes sources de vibration : Source sismique en profondeur (tremblement de terre) et source synthétique en surface (créée par l'Homme). [Karray, 2009].	5
Figure 2.2 : Illustration de l'onde compression (onde P) [ATHANASOPOULOS et coll.200].	6
Figure 2.3 : Illustration de l'onde de cisaillement (onde S) [ATHANASOPOULOS et coll.200].	6
Figure 2.4 : Illustration de l'onde de Rayleigh (onde R) [ATHANASOPOULOS et coll.200].	7
Figure 2.5 : Illustration de l'onde de Loves (onde Q) [ATHANASOPOULOS et coll.200].	8
Figure 2.6: Illustration de la méthode Cross-Hole (Karray, 2009).	11
Figure 2.7: Illustration de la Méthode Down-Hole (Karray, 2009).	12
Figure 2.8: Illustration de la Méthode MASW (Karray, 2009).	13
Figure 2.9 : Principe de fonctionnement des bilames piézoélectriques.	15
Figure 2.10 : Plaque piézoélectrique polarisée a) onde de compression induite et b) onde de cisaillement induite [BRIGNOLI et coll., 1996].	17
Figure 2.11 : Comparaison des valeurs de G_{max} obtenues à partir des essais de colonne et de bilames [Dyvik et Madshus, 1985].	18
Figure 2.12 : Méthode temporelle; propagation des ondes Pet S dans un sable [Mohammad SHARIFIPOUR].	21
Figure 2.13: Principe de la méthode des corrélations croisée [Sharifipour, 2006].	22
Figure 2.14 : Illustration de l'effet de l'épaisseur de l'échantillon sur les ondes S et P.	25
Figure 2.15: Potentiel de liquéfaction selon V_s [YOUUD et al., 2001].	27
Figure 2.16: Variation de V_s en fonction de l'indice des vides ($0,1 < D_{50} < 0,22$).	33
Figure 2.17: Variation de V_s en fonction de l'indice des vides ($0,32 < D_{50} < 0,39$).	34
Figure 2.18: Variation de V_s en fonction de l'indice des vides pour un D_{50} donné.	35
Figure 3.1 : Aperçu général du dispositif expérimental [Éthier, 2010].	37
Figure 3.2 : Principe de fonctionnement des anneaux piézo-électriques.	39
Figure 3.3 : Cellule oedométrique [Éthier, 2010].	40
Figure 3.4: Dispositif d'anneaux piézo-électriques dans une cellule oedométrique [Éthier, 2010].	41
Figure 3.5 : Illustration de différentes formes d'ondes. a) onde carrée b) onde sinusoïdale à un cycle et c) onde sinusoïdale continue [BLEWETT et coll. 2000].	42
Figure 3.6 : Cellule oedométrique équipée d'un dispositif d'anneau piézoélectrique avec les points servant pour le suivi de la variation de V_s .	43
Figure 3.7 : Illustration du déplacement déterminé à l'interface sol-émetteur et celui déterminé aux deux points de l'anneau piézoélectrique- déplacement obtenu à partir de la configuration bidimensionnelle.	44
Figure 3.8 : Illustration du déphasage du système émetteur récepteur en fonction de la fréquence.	46
Figure 3.9 : Exemple de courbe de dispersion (vitesse de phase en fonction de la fréquence) sans correction et avec correction.	47
Figure 3.10 : Exemple de courbe de correction émetteur-récepteur et sol.	47

Figure 4.1 : Récapitulatif du programme expérimental	49
Figure 4.2 : Exemple d'enregistrement obtenu avec les anneaux	51
Figure 4.3 : Sable D'Ottawa	52
Figure 4.4 : Courbe granulométrique du sable d'Ottawa C-190	52
Figure 4.5 : Sable de Milby	53
Figure 4.6 : Courbe granulométrique du sable de Milby	53
Figure 4.7 : Sable Eastman (EM)	54
Figure 4.8 : Courbe granulométrique du sable Eastman (fraction de $d < 5\text{mm}$)	54
Figure 4.9 : Till d'Eastman	55
Figure 4.10 : Courbe granulométrique du Till d'Eastman	55
Figure 4.11 : Courbes granulométriques superposées	56
Figure 5. 1 : Illustration d'un modèle de correction a) correction par rapport à la dispersion;	58
Figure 5. 2 : Courbes oedométriques pour le sable Ottawa lâche; a) $\sigma = f(\epsilon)$ et b) $E_{oed} = f(\sigma)$	59
Figure 5. 3 : Vitesses de cisaillement pour le sable Ottawa; a) $V_s = f(\sigma)$ et b) $V_{s1} = f(e)$	60
Figure 5. 4 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement.	61
Figure 5. 5 : Courbes œdométriques pour le sable d'Ottawa lâche 2;	62
Figure 5. 6 : Vitesses de cisaillement pour le sable d'Ottawa lâche 2;	63
Figure 5. 7 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement pour le sable Ottawa lâche 2. a) Évolution des modules en fonction de la contrainte; b) $G_{max}/E_{oed} = f(\sigma)$	64
La Figure 5. 8 a) montre que, $E_{oed} < G_{max}$. Tout comme pour le sable d'Ottawa lâche, pour des contraintes > 100 kPa le rapport E_{oed}/G_{max} devient constant soit environ 0,4 (Figure 5. 7). En effet, pour des valeurs de contraintes < 100 kPa Il existe une relation linéaire entre le module de cisaillement et le module oedométrique.	64
Figure 5. 9 : Courbes oedométriques pour le sable d'Ottawa dense; a) $\sigma = f(\epsilon)$ et b) $E_{oed} = f(\sigma)$	65
Figure 5. 10 : Vitesses de cisaillement pour le sable d'Ottawa dense; a) $V_s = f(\sigma)$ et b) $V_{s1} = f(e)$	66
Figure 5. 11 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement pour le sable d'Ottawa dense. a) Évolution des modules en fonction de la contrainte pour le sable d'Ottawa dense; b) $G_{max}/E_{oed} = f(\sigma)$	67
Figure 5. 12 : Courbe donnant le module cisaillement et le module de oedométrique	69
Figure 5. 13 : Courbes oedométriques pour le sable de Milby dense 1 ; a) $\sigma = f(\epsilon)$	70
Figure 5. 14 : Vitesses de cisaillement pour sable de Milby dense 1 ; a) $V_s = f(\sigma)$ et b) $V_{s1} = f(e)$	71
Figure 5. 15 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement.	72
Figure 5. 16 : Courbes oedométriques pour le sable Milby dense 2; a) $\sigma = f(\epsilon)$ et b) $E_{oed} = f(\sigma)$	73
Figure 5. 17 : Vitesses de cisaillement pour le sable milby dense 2; a) $V_s = f(\sigma)$ et b) $V_{s1} = f(e)$	74
Figure 5. 18 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement.	75
Figure 5.19 : Relation entre le module cisaillement et le module de oedométrique	76
Figure 5. 20 : Courbes oedométriques pour le sable d'Eastman dense; a) $\sigma = f(\epsilon)$	77
Figure 5. 21 : Vitesses de cisaillement pour le sable d'Eastman dense ; a) $V_s = f(\sigma)$ et	78

Figure 5. 22 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement. a) Évolution des modules en fonction de la contrainte pour sable d'Eastman dense;.....	79
Figure 5. 23 : Courbes oedométriques pour le sable d'Eastman lâche; a) $\sigma = f(\epsilon)$	80
Figure 5. 24 : Vitesse de cisaillement pour le sable d'Eastman lâche; a) $V_s = f(\sigma)$ et b) $V_{sl} = f(e)$	81
Figure 5. 25 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement. a) Évolution des modules en fonction de la contrainte pour sable d'Eastman lâche;	82
Figure 5. 26 : Relation entre le module cisaillement et le module de oedométrique.....	83
Figure 5. 27 : Courbes oedométriques de Till Eastman lâche; a) $\sigma = f(\epsilon)$ et b) $E_{oed} = f(\sigma)$	84
Figure 5. 28 : Vitesses de cisaillement pour sable de Till Eastman lâche; a) $V_s = f(\sigma)$	85
Figure 5. 29 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement. a) Évolution des modules en fonction de la contrainte pour sable de Till Eastman lâche;	86
Figure 5. 30 : Relation entre le module cisaillement et le module de oedométrique pour le Till d'Eastman.....	87
Figure 5. 31 : variation de la vitesse normalisée en fonction du diamètre médian D_{50}	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Quelques corrélations entre le V_s et N obtenu à partir de l'essai SPT. [Nilsun Hasancebi, 2006]	10
Tableau 2.2 : Relation pour évaluer V_s pour les sols granulaires	29
Tableau 2.3 : Relations empiriques de détermination de V_s ou de G_{max} en laboratoire (PATEL et al 2010)	31
Tableau 4.1 : Valeurs de charges utilisées pour les essais.....	49
Tableau 4.2 : Fréquences prises en compte dans l'essai.....	50
Tableau 4.3 : Tableau récapitulatif des valeurs caractéristiques des sols utilisés	56
Tableau 5.1 : Récapitulatif des résultats de vitesses et de modules pour le sable d'ottawa.....	68
Tableau 5.2 : Récapitulatif des résultats de vitesses et de modules pour le sable de Milby	76
Tableau 5.3 : Récapitulatif des résultats de vitesses et de modules pour le sable d'Eastman	83

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Introduction générale

La caractérisation et l'étude des sols in-situ et en laboratoire pose des problèmes particuliers. Ces derniers sont dus aux coûts élevés des forages, à la difficulté qu'on a à forer certains terrains, à la non fiabilité des résultats obtenus après le traitement des données tirées sur le terrain (car les échantillons prélevés sur le terrain sont souvent remaniés).

En effet, compte tenu des difficultés relatives à la détermination précise des propriétés géotechniques d'un sol ou d'un échantillon de sol, une multitude de méthodes basées sur la propagation des ondes ont été développées. On peut citer en occurrence les méthodes basées sur les ondes de cisaillement qui contrairement aux ondes de compression ne se propagent que dans les milieux solides ce qui rend plus facile la caractérisation du sol.

Avec l'arrivée de ces méthodes non destructives basées sur les ondes, il devient de plus en plus facile de caractériser un sol à partir de la vitesse d'ondes de cisaillement. Ce dernier est un paramètre directement relié à l'état de densité et au degré de confinement du sol.

Ces nouvelles techniques présentent des limites qui peuvent être liées entre autre à la technique de mesure utilisée, à la difficulté que l'on éprouve lors de l'interprétation des signaux et aux propriétés du sol en place. Car, plusieurs théories ou formules donnent des résultats différents de V_s en fonction des paramètres fondamentaux du sol (tels que: l'indice des vides, la contrainte effective, la densité, etc). Pour un même échantillon de sol et en fonction de la technique utilisée par le chercheur, du type de sol en place (argile, sable, etc) et de la granulométrie considérés on obtient des formules diverses et variées.

Ce travail de recherche a donc pour but principal d'examiner les méthodes de mesure de la vitesse des ondes de cisaillement au laboratoire et d'étudier l'influence de la granulométrie sur la vitesse (V_s) des sols granulaires.

Dans le présent mémoire de maîtrise, le chapitre 2 présente la revue bibliographique qui est centrée spécifiquement sur les techniques de mesure de V_s , les différentes méthodes d'interprétations des résultats et aussi l'importance de la mesure V_s des sols granulaires. La description détaillée du montage et des équipements qui serviront dans l'interprétation des signaux est faite dans le chapitre 3.

Le chapitre 4 quant à lui détaille le programme expérimental. Il décrit aussi les matériaux utilisés. Les résultats sont présentés et analysés dans le chapitre 5. Enfin, une conclusion est présentée dans le chapitre 6.

1.2 Objectifs de la recherche et contributions

Malgré l'apparition des méthodes géophysiques de caractérisation des sols, il n'en demeure pas moins que les essais SPT (méthode de pénétration standard) soient toujours les plus pratiqués pour ce qui est de la détermination des capacités portantes des sols. Cependant, la réalisation et l'interprétation des résultats de ces essais sont quelques peu douteuses, car si lors de la réalisation de l'essai sur chantier on rencontre les cailloux ou un objet solide (plaque de métal par exemple), les résultats commencent à être controversés voir même faussés.

Dans le souci de pallier à ce problème, les nouvelles techniques de mesure de V_s qui intègrent dans une cellule œdométrique les anneaux piézoélectriques permettront non seulement de caractériser un sol mais aussi de déterminer sa résistance et aussi sa capacité portante de manière plus exacte. Ceci sera possible en exploitant des corrélations qui seront établies entre le module de cisaillement (G_{max}) et le module œdométrique (E_{oed}). Ainsi, avec ce nouvel essai, on pourra gagner en efficacité et en efficience.

Pour arriver à cette avancée technologique, il a été fixé divers objectifs qui se résument en ces trois grands points :

1. Vérifier une fois de plus l'efficacité de la méthode d'interprétation de V_s . Il s'agira ici de comparer les valeurs du module œdométriques (E_{oed}) obtenues avec l'essai œdométriques à celles du module cisaillement (G_{max}) obtenues avec les anneaux piézoélectriques.

2. Comprendre l'effet de la granulométrie sur la vitesse des ondes de cisaillement
3. Produire une banque de données avec les résultats disponibles (terrain, laboratoire).

A la fin de ces différentes investigations, on pourra développer et/ou consolider de nombreuses relations qui permettront de déterminer différentes propriétés géotechniques et mécaniques des sols à partir d'une vitesse mesurée à l'aide de la technique Ring Actuator (anneaux piézoélectrique) qui est une technique développée à l'Université de Sherbrooke.

CHAPITRE 2: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Introduction

Afin d'évaluer et de comprendre l'effet de la granulométrie (grosseur des particules et degré d'uniformité) sur la vitesse des ondes de cisaillement des sols granulaires, il est judicieux de s'imprégner de la théorie de la propagation des ondes dans les sols. En plus des ondes, ce chapitre traitera des plus importantes techniques de mesure de la vitesse des ondes de cisaillement des sols (V_s).

Les problèmes soulevés dans la littérature seront analysés et la réalisation d'une étude approfondie de ces diverses méthodes sera suggérée. Ce chapitre permettra de comprendre les différentes méthodes d'interprétation des signaux. Il nous renseignera sur les sources potentielles d'erreur qu'on peut retrouver lors de la détermination de V_s .

Enfin, cette recherche bibliographique permettra d'avoir une idée précise sur les paramètres à prendre en compte lors de la mesure de V_s et aussi, elle donnera de manière pratique une idée sur l'utilisation de la vitesse des ondes de cisaillement des sols.

2.2 Généralités sur la théorie de propagation des ondes dans les sols

En se référant au dictionnaire, on peut définir d'une manière globale une onde comme étant la propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible des propriétés physiques locales [Karray, 2009]. En effet, les ondes peuvent avoir plusieurs sources de provenance. En ce qui concerne les sols, ils proviennent essentiellement des tremblements de terre et des charges vibratoires. Il existe lors de la propagation des ondes dans le sol différents types d'ondes. Celles-ci peuvent être classées en deux grands groupes, soit les ondes de volume qui se propagent à l'intérieur du milieu et les ondes de surface qui se propagent proche de la surface. La Figure 2.1 illustre les différentes sources de vibration [Karray, 2009].

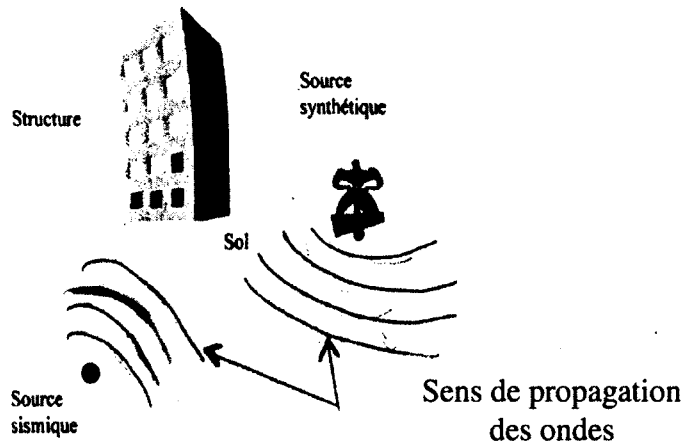


Figure 2.1: Illustration des différentes sources de vibration : Source sismique en profondeur (tremblement de terre) et source synthétique en surface [Karray, 2009].

2.2.1 Les ondes de volume

Les ondes de volume sont celles qui se propagent à l'intérieur du milieu. Elles ont une vitesse qui, non seulement dépend du matériau traversé, mais aussi qui croît progressivement avec la profondeur [Athanasopoulos et al. 2000]. Cette augmentation peut se justifier par la densification du matériau (il devient plus dense). En ce qui concerne leur temps de propagation, il est fonction du trajet suivi à l'intérieur de la terre. Il faut dire que les ondes de volume n'arrivent pas toutes en même temps au même endroit. D'où la distinction de deux formes d'ondes. L'onde de compression et l'onde de cisaillement.

A) *L'onde de compression ou onde longitudinale*

Plus connu sous le nom d'onde P, l'onde de compression (voir Figure 2.2) est celle qui lors de la propagation arrive en premier. L'onde de compression a la particularité de se propager dans tous les milieux et plus particulièrement dans l'eau [Karray, 2009]. En effet, la vitesse de compression (V_p) associée à l'onde de compression est considérablement affectée par la présence de l'eau dans les sols saturés.

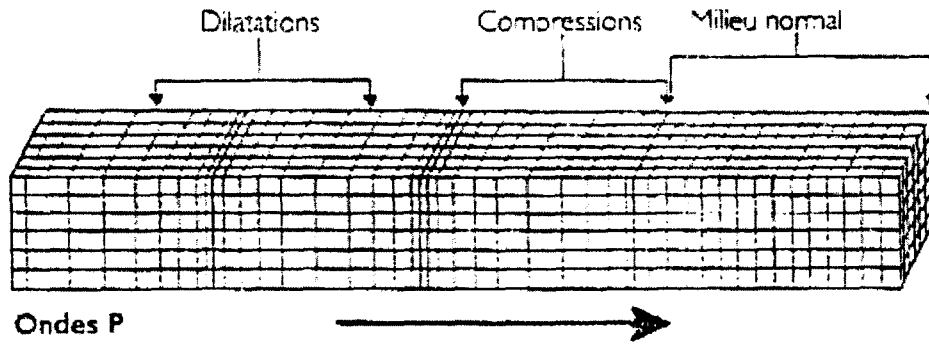


Figure 2.2: Illustration de l'onde compression (onde P) [Athanasopoulos et al. 2000]

B) L'onde de cisaillement (onde S) ou onde transversale

Contrairement aux ondes de compression, les ondes de cisaillement (voir Figure 2.3) ne se propagent que dans les milieux solides. Elles surviennent généralement à la suite des ondes (P). Le mouvement du sol à leur passage est perpendiculaire au sens de propagation de l'onde.

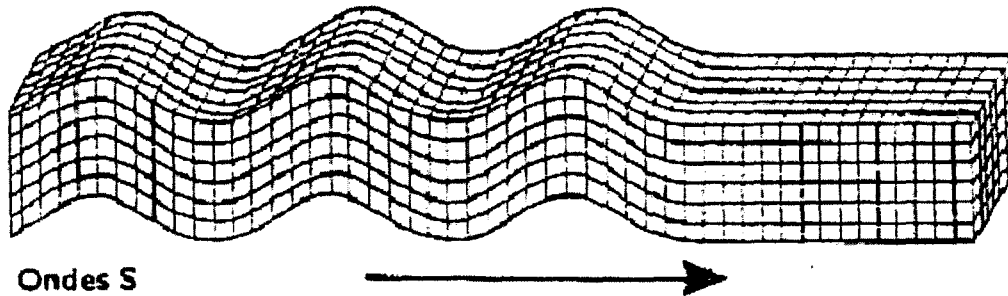


Figure 2.3: Illustration de l'onde de cisaillement (onde S) [Athanasopoulos et al. 2000]

En considérant V_p et V_s comme étant respectivement les vitesses de compression et de cisaillement associées aux ondes (P) et (S), les expressions suivantes sont données :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2)$$

Avec
$$\lambda = \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (2.3)$$

et
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.4)$$

Où :

E est le module d'élasticité,

ν le coefficient de poisson,

ρ la masse volumique,

G, λ sont les constantes de Lamé.

2.2.2 Les ondes de surface

Tout comme les ondes de volume, les ondes de surfaces se propagent dans le sol en formant deux autres ondes qui sont les ondes de Rayleigh et les ondes de Love. Elles proviennent essentiellement de l'arrivée en surface des ondes de volume. En effet, ces ondes sont légèrement moins rapides que les ondes de cisaillement, soit 0,92 à 0,95 fois [Karray, 2009]. Par ailleurs, elles ont généralement de plus forte amplitude lorsque mesurées en surface.

A) L'onde de Rayleigh

Les ondes de Rayleigh ou onde R (Figure 2.4) sont des ondes pour lesquelles le déplacement des particules est à la fois horizontal et vertical.

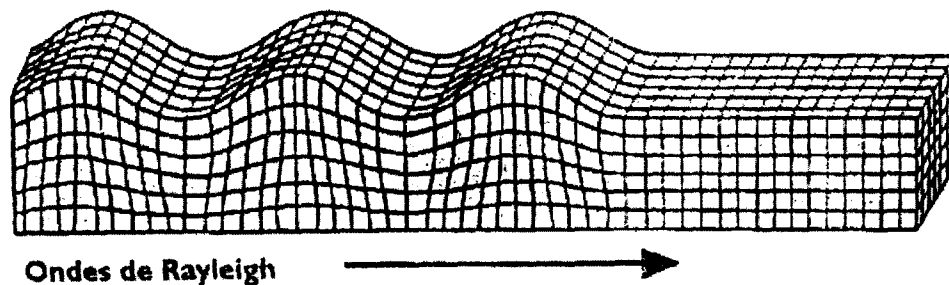


Figure 2.4: Illustration de l'onde de Rayleigh (onde R) [Athanasopoulos et al. 2000]

B) Les ondes de Love (ondes Q)

L'onde de Love est une onde transversale polarisée dans le plan horizontal qui se propage uniquement dans les solides non homogènes. Son déplacement est le même que celui des ondes (S) mais sans mouvement vertical. Généralement appelées ondes (Q), elles provoquent à leur passage un ébranlement horizontal (voir Figure 2.5). Ce qui cause de nombreux dégâts par cisaillement des fondations des édifices lors des tremblements de terre.

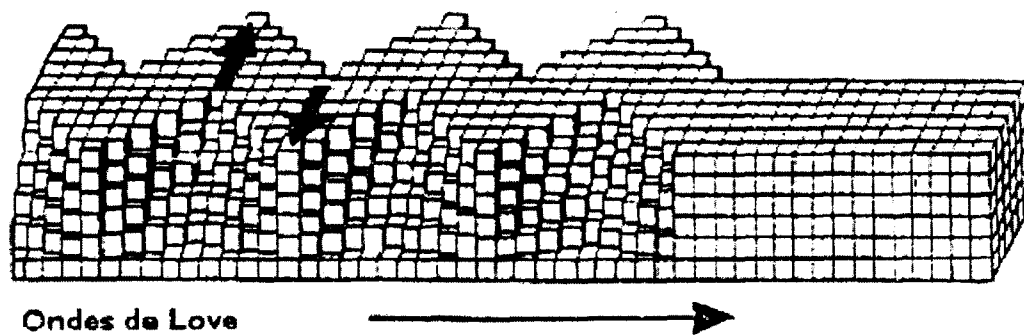


Figure 2.5: Illustration de l'onde de Love (onde Q) [Athanasopoulos et al. 2000]

2.3 Technique de mesure de la vitesse des ondes de cisaillement dans les sols.

La détermination de la réponse d'un site à une sollicitation sismique nécessite la connaissance des propriétés dynamiques du sol, particulièrement la vitesse de propagation des ondes de cisaillement (V_s). Il est préférable de mesurer ce paramètre dynamique dans les vraies conditions du terrain (in-situ). Toutefois, ceci n'est pas toujours possible en raison de la configuration du site et des contraintes économiques. V_s peut être déterminée directement à l'aide d'une méthode de mesure géophysique ou indirectement par le biais des méthodes d'investigation géotechnique (exemple : SPT, CPT). Ce paramètre peut également être mesuré au laboratoire, sur des échantillons de sols reconstitués, dans le cas des sols granulaires, ou intacts, dans le cas des sols cohérents.

2.3.1 Les méthodes in situ

A) La méthode de pénétration standard « SPT »

La méthode de pénétration standard (SPT) est l'une des plus anciennes méthodes qui permet la caractérisation des sols. L'essai SPT a été développé aux États-Unis d'Amérique et il est l'un des essais plus utilisés dans le monde [Nilsun Hasancebi, 2006]. En effet, il permet d'obtenir la mesure de la résistance du sol et de prélever des échantillons remaniés indicatifs des couches traversées.

Il comporte :

- Un appareillage de forage et un tube fendu qui permet le prélèvement d'échantillons de 5 cm de diamètre.
- Un mouton de battage de 140 lbs (63,5 kg) avec une chute libre de 76 cm.

L'essai se déroule comme suit :

Un trou est creusé et nettoyé jusqu'à la profondeur d'échantillonnage. Ensuite, des échantillons sont pris à chaque changement de couche, mais à des intervalles ne dépassant pas 1,50 m simultanément, le nombre N de coups est compté par 30 cm d'enfoncement. La vitesse des ondes de cisaillement peut ensuite être déterminée à partir de formules établies par de nombreux chercheurs (tableau 2.1).

Tableau 2.1: Quelques corrélations entre le V_s et N obtenu à partir de l'essai SPT. [Nilsun Hasancebi, 2006]

Author(s)	V_s (m/s)		
	All soils	Sands	Clays
Ohba and Toriumi (1970)	$V_s = 84N^{0.31}$	-	-
Imai and Yoshimura (1970)	$V_s = 76N^{0.33}$	-	-
Fujiwara (1972)	$V_s = 92.1N^{0.337}$	-	-
Ohsaki and Iwasaki (1973)	$V_s = 82N^{0.39}$	-	-
Imai (1977)	$V_s = 91N^{0.337}$	$V_s = 80.6N^{0.331}$	$V_s = 80.2N^{0.292}$
Ohta and Goto (1978)	$V_s = 85.35N^{0.348}$	-	-
Seed and Idriss (1981)	$V_s = 61N^{0.5}$	-	-
Imai and Tonouchi (1982)	$V_s = 97N^{0.314}$	-	-
Sykora and Stokoe (1983)	-	$V_s = 100.5N^{0.29}$	-
Jinan (1987)	$V_s = 116.1(N + 0.3185)^{0.202}$	-	-
Lee (1990)	-	$V_s = 57.4N^{0.49}$	$V_s = 114.43N^{0.31}$
Sisman (1995)	$V_s = 32.8N^{0.51}$	-	-
Iyisan (1996)	$V_s = 51.5N^{0.516}$	-	-
Jafari et al. (1997)	$V_s = 22N^{0.85}$	-	-
Pitilakis et al. (1999)	-	$V_s = 145(N_{60})^{0.178}$	$V_s = 132(N_{60})^{0.271}$
Kiku et al. (2001)	$V_s = 68.3N^{0.292}$	-	-
Jafari et al. (2002)	-	-	$V_s = 27N^{0.73}$

B) La méthode Cross-Hole

Elle est considérée comme étant la plus complexe mais la plus précise de toutes les autres méthodes. En effet, celle-ci permet de mesurer la vitesse d'onde de cisaillement ou de compression entre deux trous de forages relativement proches.

Il s'agit ici de faire trois trous de forages dont les espacements doivent être selon Ballard (1976) inférieurs à 6,1 m, et ce, dans le but d'éviter les effets de réflexion et de réfraction. Dans un des trous, il est introduit la source d'énergie. Les récepteurs quand à eux sont placés à la même profondeur que la source mais dans les trous de forage voisins; ceux-ci sont comprimés contre les parois intérieures de deux tubes en pvc. Connaissant la distance entre les deux récepteurs ainsi que le temps de propagation de l'onde entre ceux-ci, on mesure directement la vitesse des ondes de cisaillement et/ou de compression à la profondeur voulue (Figure 2.6). Cependant, Bien qu'étant la plus précise des méthodes de mesure de V_s elle présente néanmoins des limites qui sont liées au degré de confiance et à la facilité avec laquelle il est possible de mesurer le temps d'arrivée de l'onde de cisaillement.

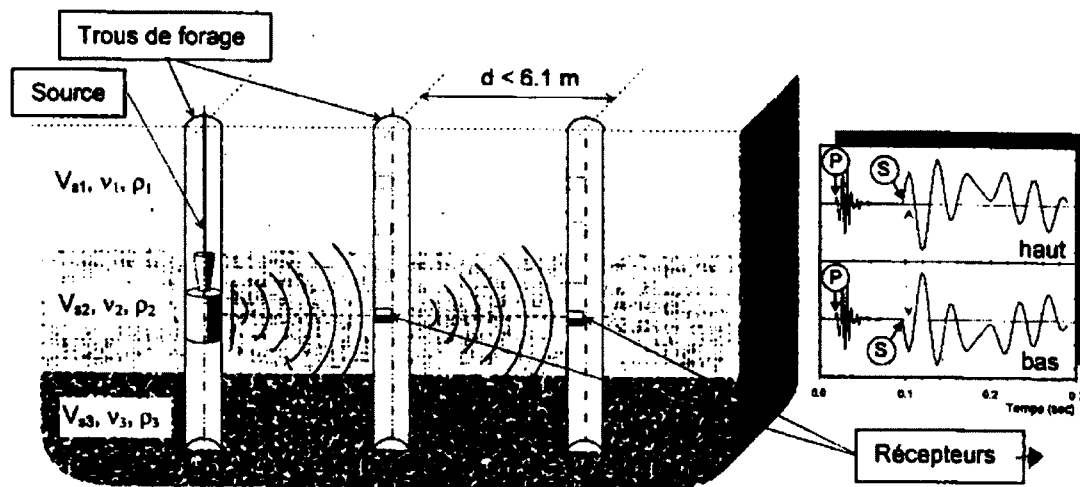


Figure 2.6: Illustration de la méthode Cross-Hole [Karray, 2009]

C) La méthode Down-hole

La méthode Down-hole utilise un trou de forage à l'intérieur duquel sont placés des récepteurs qui sont collés sur les parois internes d'un tube en pvc (Figure 2.6).

La source d'énergie qui est placée à la surface permet de mesurer le temps de propagation d'une onde entre un point situé à la surface (au niveau de la source) et un autre situé à l'intérieur du milieu investigué (au niveau des récepteurs). Afin de rendre possible cette mesure de temps de propagation, la source doit être munie d'un déclencheur automatique permettant d'ouvrir les récepteurs lors de l'impact. La vitesse de propagation de l'onde de compression ou de cisaillement est alors donnée par la pente décrite entre deux points situés à des profondeurs différentes.

En dehors du fait que cette méthode utilise un seul trou de forage, elle présente aussi l'avantage d'avoir une source facilement accessible et manipulable. L'inconvénient majeur de cette méthode est relié aux faibles énergies qu'ont les différentes ondes en profondeur.

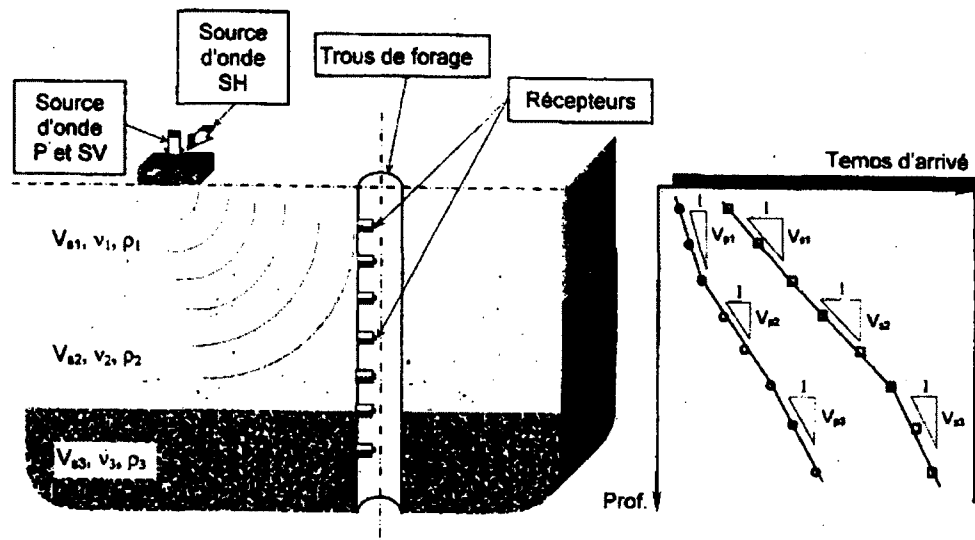


Figure 2.7: Illustration de la Méthode Down-Hole [Karray, 2009]

D) La méthode MASW (modal analysis of surface wave)

La MASW est une méthode géophysique qui a été développée à l'université de Sherbrooke dans les années 90. Cette méthode vient palier aux difficultés rencontrées avec la méthode SASW. En effet, la méthode MASW utilise des procédés de traitement des signaux pour isoler et identifier les différents modes de l'onde de Rayleigh [Karray, 2009].

La Figure 2.8 illustre la configuration pour la réalisation de cette méthode. Celle-ci nécessite l'utilisation de 16 capteurs placés à la surface du terrain. Ces capteurs mesurent le passage des ondes générées à l'aide d'une source placée elle aussi à la surface. Les 16 signaux mesurés par les capteurs sont exploités pour déterminer le profil MASW. L'ensemble des profils obtenus peuvent être utilisés pour présenter les résultats sous forme de contours de V_s permettant une certaine tomographie en 2D du dépôt de sol [Karray, 2009].

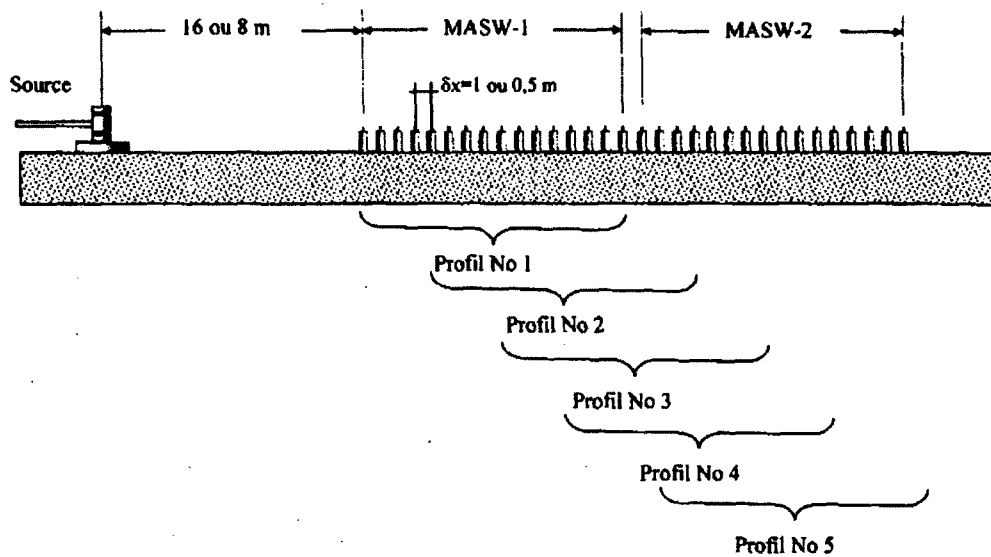


Figure 2.8: Illustration de la Méthode MASW [Karray, 2009]

2.3.2 Les méthodes utilisées en laboratoire

A) La colonne de résonnance

La colonne de résonnance est probablement la première méthode mise au point pour la détermination de la vitesse en laboratoire [Richart et al. 1970].

Elle consiste à analyser la réponse en torsion d'un échantillon cylindrique de sol soumis à des vibrations harmoniques forcées. Le dispositif expérimental est presque le même que celui de l'essai de torsion. La grande différence est que les déplacements sont mesurés à l'aide d'accéléromètre. L'appareillage est principalement constitué de bobines, de quatre aimants, d'une plaque de guidage et d'accéléromètres.

Principe

Un courant est introduit dans des bobines qui entourent un aimant. Ceci crée un champ électromagnétique qui provoque le mouvement de l'aimant. Ce dernier étant fixé sur la plaque de guidage, il transmet le mouvement à la tête de l'échantillon. Les déplacements résultant sont mesurés à partir des accéléromètres. V_s est déterminé à partir de l'Équation (2.5) et ceci après avoir déterminé le premier mode de fréquence de résonnance de l'échantillon de sol.

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{w.L}{V_s} \right)^2 \quad (2.5)$$

Avec :

L: longueur de l'échantillon

I : moment d'inertie massique de l'échantillon

I_0 : moment d'inertie massique de la masse supplémentaire (tête)

$W_n = 2\pi f_n$ où f_n , étant la fréquence naturelle du sol, obtenue directement d'après le graphe « Réponse accéléromètre a versus fréquence f_n ».

B) Essai des bilames piézoélectrique « Bender Element »

L'essai des bilames piézo-électriques à commence à susciter de l'intérêt dans les années 90 avec l'amélioration des éléments piézoélectriques. Cette technique a été développée dans les années 70 par Shirley et Hampton (1978). Elle permet la mesure de la vitesse V_s du sol à partir de la propagation d'onde dans le domaine des petites déformations. Il s'agit de capteurs piézo-électriques implantés dans un appareil de mesure (exemple : triaxial, oedomètre, etc) qui émettent et reçoivent des ondes de cisaillement.

Principe de fonctionnement

Le dispositif expérimental est composé de deux plaques (ou lamelles) polarisées de façon permanente et encastrées l'une contre l'autre. Des couches isolantes faites d'époxy séparent ces plaques de l'électrode centrale qui est très mince et est faite de cuivre ou de laiton. La polarisation du matériel céramique et les connexions électriques sont telles que, lorsqu'une tension est appliquée à l'élément, une plaque s'allonge et l'autre se raccourci. Cela produit donc une déformation mécanique qui est supérieure au changement de longueur qui se produit entre les deux couches (Figure 2.9 (a)). D'autre part, lorsqu'une force extérieure s'exerce sur le Bender élément, il est forcé de se tordre, une plaque part en tension et l'autre en compression. Ainsi, il en résulte un signal électrique, qui peut être détecté et mesuré par un oscilloscope branché au dispositif (Figure 2.9 (b)).

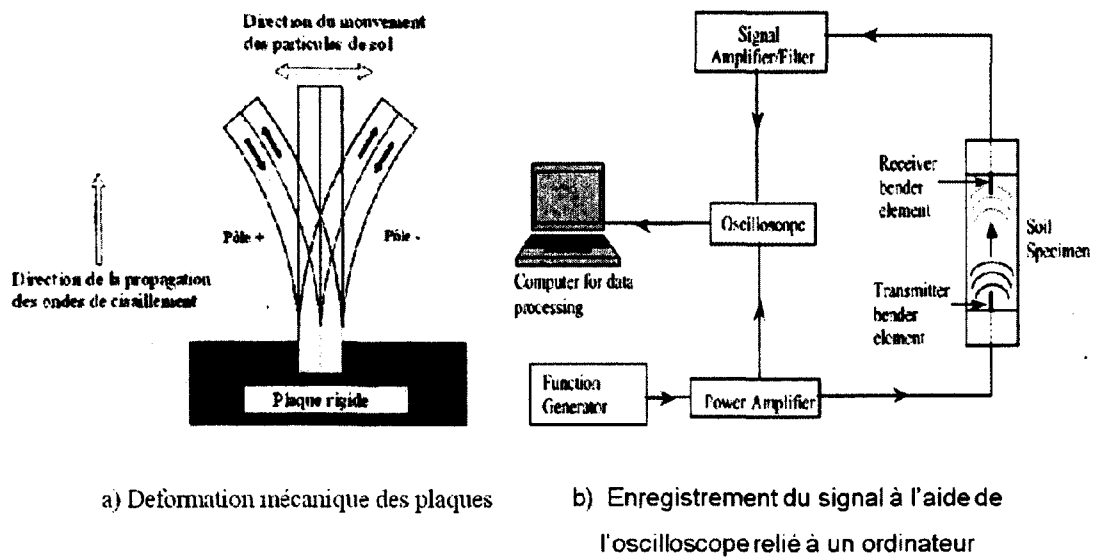


Figure 2.9: Principe de fonctionnement des bilames piézoélectriques
[Leong et al. 2005]

La vitesse des ondes de cisaillement est donnée par l'équation (2.6) où t est le temps de parcours qui est déterminé en enregistrant de façon continue les tensions d'entrées et de sorties. Et, h est l'épaisseur de l'échantillon.

$$V_s = \frac{h}{t} \quad (2.6)$$

À cause de l'effet de bord, il est difficile dans le domaine du temps de mesurer le temps exact d'arrivée des ondes. Pour un meilleur fonctionnement, les bilames doivent répondre à plusieurs critères.

Critères de choix des bilames [Challouf, 2009]

Les plus importants critères à prendre en compte sont les suivants :

- Le bilame émetteur doit imposer au sol une déformation assez importante pour que l'onde de cisaillement se propage jusqu'au bilame récepteur avec une amplitude supérieure aux éventuelles ondes parasites (bruit ambiant).
- Parce que le sol atténue les hautes fréquences, les bilames doivent avoir une sensibilité plus élevée à basse fréquence.
- Ils doivent avoir des dimensions compatibles avec l'espace disponible.
- Ils doivent être robustes et durable afin de subsister à plusieurs cycles de sollicitation.
- Leur impédance doit être semblable à celle du sol pour permettre le bon transfert.

Comme les plaques de cisaillement, les bilames piézoélectriques ne peuvent être exposés à l'humidité. Sinon il y a risque de court-circuit. De ce fait, Il devient nécessaire de les rendre étanches. Certains utilisateurs choisissent pour cela de les recouvrir d'un mélange d'époxy [Dyvik et Madshus, 1985, Perret et Lefebvre, 1995, brignoli et al. 1996] ou encore de polyuréthane [Santamarina et al. 2001].

Outres ces critères, il incombe aux utilisateurs de choisir le montage des bilames. En effet, le choix du montage est une question d'optimisation de l'intensité du déplacement dans le cas d'un bilame émetteur, et de l'intensité du potentiel électrique pour le cas d'un bilame récepteur. Ainsi, il existe dans la littérature deux types de montage.

Le montage en parallèle permet la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. Il est utilisé pour les capteurs émetteurs. Quant au montage en série, il est l'inverse du montage en parallèle, il transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Il est utilisé pour les capteurs récepteurs.

Utilisation des bilames

La popularité de cet essai se justifie par la facilité qu'ont les bilames à être insérés dans la majorité des équipements de laboratoires. Un élément émetteur ou récepteur peut être placé dans divers dispositifs expérimentaux. On peut les placer dans un oedomètre où les bilames sont placés à la fois à la tête et à la base de la cellule [Lee et al. 2008]. Ils peuvent aussi être mis dans

la boîte de cisaillement simple. On peut encore les disposer dans la cellule triaxiale classique. Ce dernier arrangement permet de mesurer les modules de cisaillement dans les trois directions d'un échantillon anisotrope [Pennington et al. 2001].

C) Essai des plaques de cisaillement

La Figure 2.10 illustre d'une manière globale le principe de fonctionnement des plaques de cisaillement. En effet, lorsqu'elles subissent une différence de potentiel électrique, elles se déforment et, inversement, lorsqu'elles sont déformées par une sollicitation mécanique extérieure, elles génèrent un potentiel électrique. Cependant, en présence de l'eau ou des problèmes liés à l'eau (infiltration, humidité), les plaques sont protégées par un système de protection qui assure leur étanchéité.

Les travaux de Brignoli, Gotti, Stokoe II (1996), démontrent que, l'essai des plaques de cisaillement est très robuste et simple à manipuler. Ceci est d'autant plus vrai pour les échantillons de sols intacts. En présence d'échantillons non-remaniés ou comportant des agrégats grossiers comme par exemple, les sols granulaires, Brignoli et al recommandent fortement l'utilisation de l'essai des plaques de cisaillement à cause de la nature du contact entre les capteurs et le sol. En effet, le sol n'est pas perforé localement comme c'est le cas avec les bilames piézo-électriques.

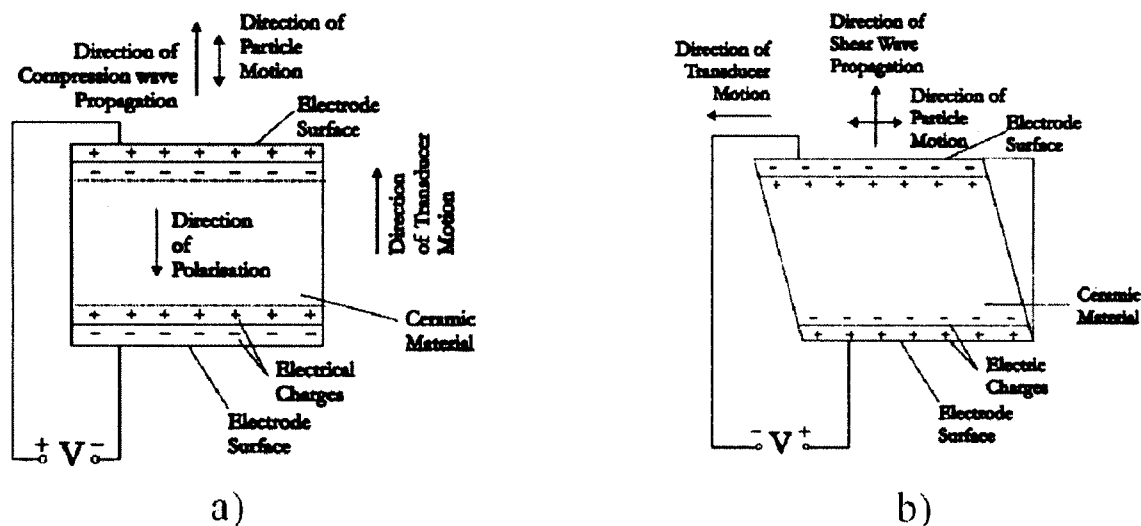


Figure 2.10: Plaque piézoélectrique polarisée a) onde de compression induite et b) onde de cisaillement induite [Brignoli et al. 1996].

D) Étude comparative des méthodes de détermination de V_s en laboratoire

En vue de comparer et d'évaluer la fiabilité des différentes méthodes de mesure de V_s en laboratoires, des chercheurs ont menés des investigations sur différents type de sol. Brignoli et al. (1996) ont réalisé des essais à la fois de colonne de résonance et de Bender élément sur un silt argileux légèrement sableux. Dyvik et Madshus (1985) ont travaillé sur les argiles en faisant des essais de colonne de résonance équipée de bilames piézoélectrique.

Ces derniers ont conclut que pour la détermination du module de cisaillement, les essais de colonne et de bilame se complètent. Car les résultats des deux méthodes concordent (figure 2.11)

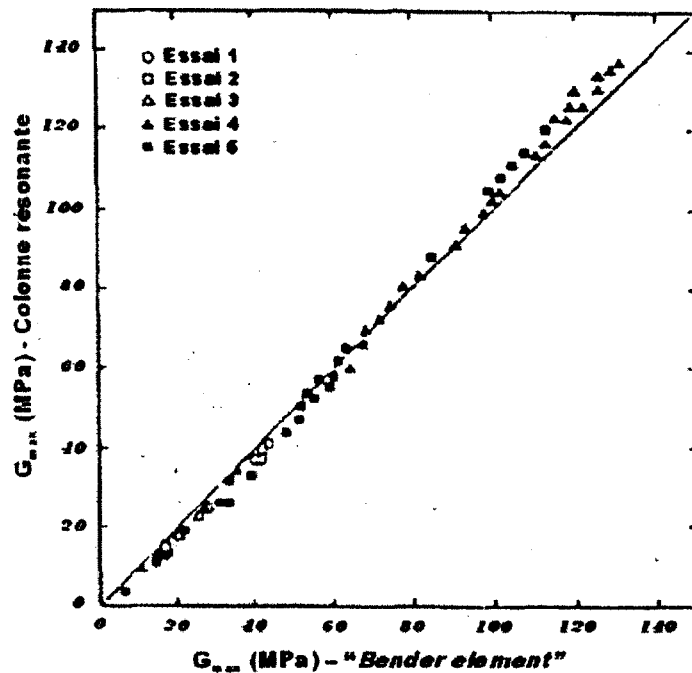


Figure 2.11: Comparaison des valeurs de G_{max} obtenues à partir des essais de colonne et de bilames [Dyvik et Madshus, 1985].

Si on compare les valeurs de V_s obtenues à l'aide de la colonne résonance à celles obtenues par "Bender Element" pour différentes valeurs des contraintes de confinement (essai 1, ..., 6), On observe que, lors de la phase de consolidation primaire de l'échantillon, les valeurs de V_s augmentent en fonction de l'augmentation de la contrainte de confinement. Pendant la phase de consolidation secondaire, ce sont les valeurs de V_s obtenues par la colonne résonance qui

augmentent en fonction du temps. Avec les plaques de cisaillement, les valeurs de V_s restent constantes.

En se référant à l'exemple avec le silt argileux de Brignoli et al. (1996), il est constaté un écart de 2% entre les valeurs de V_s obtenues avec les "Bender Élément" et ceux trouvées avec les plaques de cisaillement. Aussi, pour les mêmes échantillons, les mesures effectuées à l'aide de la colonne de résonance et ceux effectuées avec les "Bender Élément" donnent des valeurs de vitesse de cisaillement plus importantes (8%). Brignoli et al. (1996) remarquent alors que les valeurs de V_s obtenues avec les "Bender Élément" sont supérieures à celles obtenues par la colonne de résonance.

2.3.3 Les paramètres à prendre en compte dans la détermination de V_s au moyen des bilames

Il faut considérer principalement la distance de propagation, le temps d'excitation, le temps de propagation et la dispersion. Ces deux derniers seront traités dans la section traitement de signaux.

A) Distance de propagation

La distance de propagation effective est un sujet de discussion soulevé par plusieurs auteurs. Il s'agit ici de la distance entre l'onde émise et l'onde reçue. Viggiani et al. (1995) recommandent la distance qui sépare les deux extrémités libres des bilames émetteur et récepteur. Cette proposition est justifiée par la réalisation des essais en utilisant différents transducteurs. Dyvick et al. (1985) justifient quant à eux ce choix par la confrontation des valeurs de G_{max} trouvées au moyen d'une colonne de résonance à ceux obtenues par des bilames piézoélectriques, en montrant que la corrélation entre ces deux valeurs est satisfaisante en considérant que la distance de propagation correspondant à la distance entre les extrémités libres des bilames.

Pour ce qui est de la longueur de pénétration des bilames, Jovicic et al. (1996) et Lings et Greening (2001) ont choisi une longueur de 3 mm. Tandis que Arulnathan et al. (1998) ont opté pour des longueurs de 4 à 5 mm dans le souci d'avoir la valeur du rapport de la longueur d'onde sur la longueur de pénétration du bilame comprise entre 8 et 16.

B) Temps excitation

L'excitation recommandée par les chercheurs [Jovicic et al. (1996); Viggiani et al. (1995)] est une excitation sinusoïdale. En effet, ils considèrent que, l'écart entre les mesures est moins important dans ce cas que dans l'émission d'une onde carrée. Cette dernière se compose de toutes les fréquences ce qui contribue à induire l'effet du champ proche à son émission. Cela rend l'interprétation du signal reçu plus difficile.

2.4 Interprétation des signaux : Méthodes et sources d'erreur

Comme vu à la section 2.3, il existe un certain nombre de techniques de mesures de V_s en laboratoire. Les résultats obtenues à partir de ces techniques sont des fois controversés et contradictoires. Cette difficulté est principalement liée à l'interprétation des signaux qui indépendamment de la technique ou de la méthode demeure complexe. Il existe une incertitude dans la détermination de la vitesse. Dans la littérature, il existe une multitude de méthodes qui permettent l'interprétation des signaux. Dans cette partie, on détaillera les méthodes les plus utilisés par les chercheurs.

2.4.1 Les méthodes

L'interprétation des essais de propagation d'ondes la plus couramment mise en œuvre n'exploite que l'arrivée de l'onde sur le récepteur, donc la moins riche en information. Les méthodes d'interprétation alternatives, basées sur des outils mathématiques tels que la corrélation croisée des signaux [Sanchez Salinero et al. 1987 ; Mohsin et al., 2003] ou l'analyse de Fourier [Mancuso et al., 1989 ; Viggiani et al., 1995 et Greening et al., 2004] tirent mieux profit de l'information contenue dans les signaux reçus. Cependant, certaines interrogations demeurent sur les résultats obtenus par ces méthodes alternatives, en particulier dans les milieux granulaires.

A) La méthode temporelle

La méthode temporelle est la plus utilisée pour interpréter les essais de propagation d'ondes. Sharifipour (2006) présente cette méthode de manière détaillée. En effet, elle consiste à pointer sur le signal reçu, la déviation du signal correspondant à l'instant à laquelle l'onde propagée atteint le récepteur. La première déviation du signal reçu est très nette (voir le point A sur la Figure 2.12(a)). Cependant, pour les ondes de cisaillement, une analyse plus importante est

requis car ces ondes (S) se propagent en même temps que des ondes parasites générées par ces mêmes ondes S. Cette méthode est fiable pour les ondes de compression qui sont les plus rapides. Sur la Figure 2.12 (b), le point A' correspond à l'arrivée de l'onde parasite. Ces ondes parasites peuvent, dans certains cas, masquer l'arrivée de l'onde S recherchée. Ce phénomène appelé effet de champ proche a été mis en évidence par Sanchez-Salinerio et al. (1986).

Lorsque le rapport de la longueur de l'échantillon sur la longueur d'onde du signal est inférieur à 4 et en présence l'effet au champ proche, alors, l'arrivée de l'onde S sur le récepteur correspond au premier changement de signe de la dérivée du signal (Point B' sur la Figure 2.12 (b)) ou au premier zéro suivant ce changement de signe (point C' sur la Figure 2.12 (b)). Cette méthode a été utilisée dans le cadre d'un essai à l'échelle internationale [Jovićić et al. 1996 ; Brignoli et al., 1996].

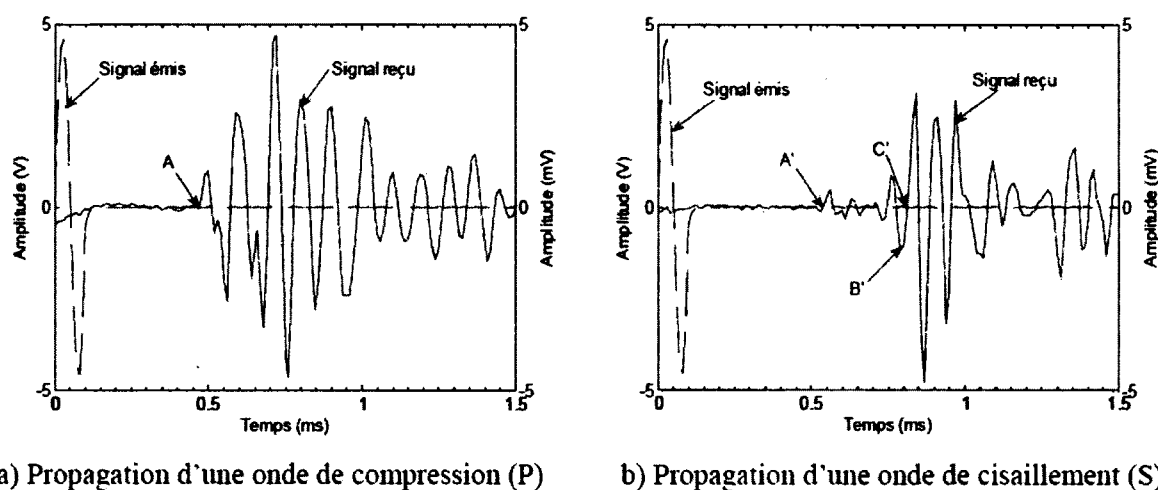


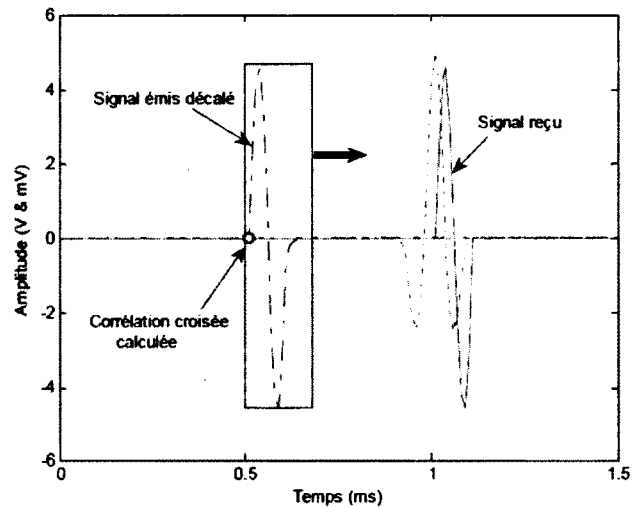
Figure 2.12 : Méthode temporelle; propagation des ondes Pet S dans un sable [Sharifipour].

B) La méthode des corrélations croisées

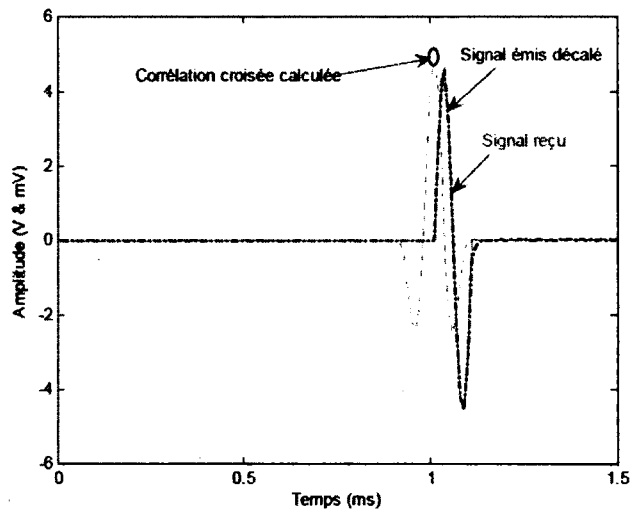
La corrélation croisée consiste à traduire, sur l'échelle des temps, le signal émis de manière à superposer celui-ci au signal reçu. Cette méthode, bien que souvent utilisée, donne des résultats parfois aberrants [Sharifipour (2006)]. En effet, pour être pleinement efficace, cette méthode requiert une distorsion faible des signaux reçus, de manière à ressembler aux signaux émis [Sharifipour (2006)]. La propagation des ondes dans les milieux particuliers s'accompagne de

phénomènes complexes : atténuation, dispersion, conversion d'ondes altérant la forme de l'onde propagée.

Sharifipour (2006) affirme que, la corrélation croisée peut être utilisée comme un indicateur mais en aucun cas comme une mesure fiable du temps de propagation de l'onde.



a) Arrivée des ondes



b) Croisement des ondes

Figure 2.13: Principe de la méthode des corrélations croisée [Sharifipour, 2006]

C) La méthode fréquentielle

L'analyse fréquentielle permet de transformer les signaux du domaine temporel vers le domaine fréquentiel. Elle détermine ainsi la vitesse de phase et la vitesse de groupe des signaux [Bodare et al., 1984 ; Mancuso et al., 1989 ; Viggiani et al.1995 ; Greening et al., 2003]. Les résultats obtenus par la méthode fréquentielle dans des milieux granulaires ne sont pas toujours en accord avec les résultats obtenus par la méthode temporelle [M. Sharifipour (2006)]. Une cause possible des écarts observés tient à la nature de l'onde propagée [Jia et al. 1999 ; Gilles, 2001]. En effet, cette onde propagée peut se décomposer en une partie cohérente qui ne s'annule pas lorsqu'on fait la moyenne de plusieurs signaux obtenus dans des conditions identiques [Coste, 2005] et une partie incohérente due aux phénomènes complexes liés à la propagation de l'onde qui s'annule lorsqu'on moyenne plusieurs signaux obtenus dans des conditions identiques.

Outre les méthodes fréquentielles, il y a la méthode π -point qui peut être exploitée. L'objectif de cette méthode vise à mettre en phase les signaux émis et reçus pour faciliter les calculs [Greening et Nash, 2004]. Dans la méthode des signaux continus, la différence de phase entre les signaux est calculée pour une fréquence donnée et il faut réaliser des essais avec différentes fréquences. Dans la méthode π -point, la fréquence est ajustée de manière à établir une différence de phase prédéfinie entre les signaux émis et reçus, en général un multiple de π .

2.4.2 Sources d'erreur

Plusieurs phénomènes ou paramètres peuvent être à l'origine de ses erreurs. On peut citer entre autre, l'effet du champ proche qui a été abordé dans les paragraphes précédents, la dispersion, la granulométrie et l'épaisseur de l'échantillon.

A) L'effet du champ proche

L'effet de champ proche qui est souvent mentionné dans la littérature est en fait une manifestation qui se traduit par une descente dans le signal temporel de réception avant l'arrivée de l'onde de cisaillement (positive), qui vient donc masquer le véritable moment de l'arrivée de cette onde de cisaillement [Ethier, 2010].

Les principales caractéristiques pour l'identification de l'effet de champ proche sont :

- L'identification d'une onde qui se propage plus rapidement que l'onde de cisaillement en l'absence de l'émission d'un mouvement dans le sens d'une onde de compression;
- La polarité de cette onde est opposée à la polarité de l'onde de cisaillement (l'onde de cisaillement volontairement induite);
- Une atténuation rapide de cette onde avec l'augmentation du rapport d/λ ,

Où

d , la distance parcouru par l'onde et

λ , la longueur d'onde.

Brignoli et al. (1996) utilisent des plaques piézoélectriques pour observer le phénomène de champ proche. Ils suggèrent d'utiliser une configuration où le rapport $d/\lambda > 2$ afin de minimiser l'effet de champ proche, ils indiquent néanmoins qu'un rapport d/λ de 4 ou 5 est préférable.

B) La granulométrie et épaisseur de l'échantillon

Rio (2003) affirme que l'effet de la géométrie des échantillons a rarement été pris en considération lors de l'interprétation des essais de propagation d'onde dans une cellule triaxiale. Il propose, à partir d'une étude menée sur des « échantillons synthétiques » à surface latérale libre que, pour des rapports $h^2/D > 45$ mm, (h est l'épaisseur des échantillons et D leur diamètre), l'échantillon agit comme un « guide » d'ondes et que les ondes P réfléchies peuvent arriver avant l'onde de cisaillement. Au contraire, lorsque $h^2/D < 45$ mm, l'hypothèse de propagation en milieu semi-infini est bien justifiée. Pour $D = 100$ mm, la hauteur empirique seuil serait alors de 67 mm ($h/D < 1$).

En ce qui concerne l'épaisseur de l'échantillon, des essais de mesure de V_s ont été réalisés par Karam (2006) sur des échantillons de sable sec ayant différents diamètres et épaisseurs. Il est constaté que l'arrivée de l'onde S est d'avantage masquée par l'onde P avec l'augmentation de l'épaisseur (Figure 2.14).

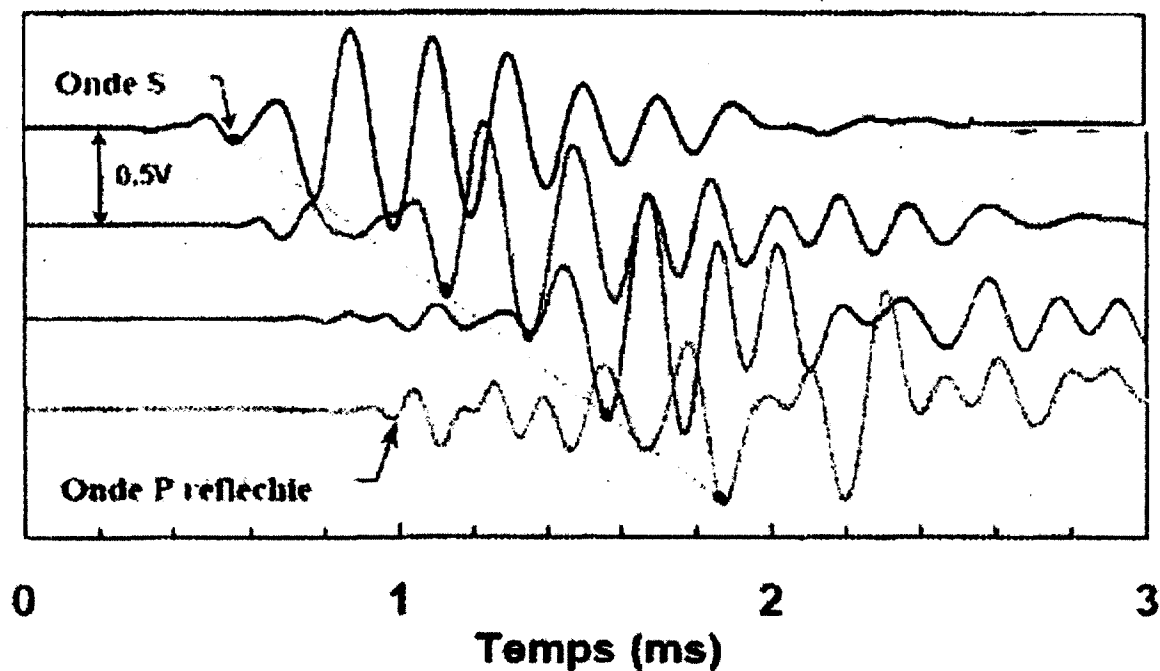


Figure 2.14: Illustration de l'effet de l'épaisseur de l'échantillon sur les ondes S et P

C) La dispersion

Le diamètre des pores et la perméabilité du sol sont les principaux facteurs contribuant aux phénomènes d'atténuation et de dispersion [Stoll et Bryan, 1970]. En effet, on attribue ces phénomènes (atténuation et dispersion) à des pertes d'énergie causées par le mouvement des particules les unes par rapport aux autres d'une part et, d'autre part, par le mouvement du liquide interstitiel par rapport aux particules (pertes visqueuses). D'après le modèle de Biot, les pertes d'énergie seraient surtout attribuables aux pertes dans la matrice (dans les sols à grains fins). Cependant, les pertes seraient d'avantages visqueuses dans les sols granulaires, [Blewett et al., 2000].

La limite en fréquence, f_c , au-delà de laquelle la dispersion devient importante serait, d'après ce modèle, bien supérieure dans le cas des argiles par rapport au cas des sols granulaires.

2.5 Utilisation de la vitesse des ondes de cisaillement des sols granulaires

2.5.1 Utilisation de V_s des sols granulaires (application)

De manière pratique, la vitesse des ondes de cisaillement peut être utilisée pour plusieurs raisons. Quelques unes (Karray, 2009) sont présentées ci-dessous:

- La détection du niveau du socle rocheux : pour les études relatives à la construction d'une digue ou d'un barrage ou encore pour l'étude des fondations,
- La détection des zones altérées : pour l'étude des tracées de tunnels, pour l'alimentation en eau d'une région et pour le trafic ferroviaire ou routier,
- La détermination des cavités souterraines pour les fondations des bâtiments,
- Le contrôle de l'intégrité des structures existantes comme la détection des vides causés par l'affaissement au sein du corps d'une digue,
- La détection des obstacles dans un dépôt de sol ou la détermination des profils des ouvrages souterrains.

2.5.2 Autre utilisation de V_s : Le phénomène de liquéfaction

Marcuson, (1978) définit la liquéfaction comme étant le passage d'un matériau granulaire de l'état solide à l'état liquéfié suite à une augmentation de la pression interstitielle et à une réduction de la contrainte effective. Ce phénomène se produit généralement dans les sols granulaires saturés et dans les sols granulaires lâches déposés naturellement ou mécaniquement par l'homme.

Il est maintenant possible au moyen de la vitesse d'évaluer le potentiel de liquéfaction d'un sol. Cette évaluation est faite à partir d'essai qui permet de déterminer la ligne d'état critique (indice des vides (e) versus contrainte confinement). Il est mesuré par la suite l'évolution de e et V_s en fonction de la pression de consolidation [Ethier, 2010].

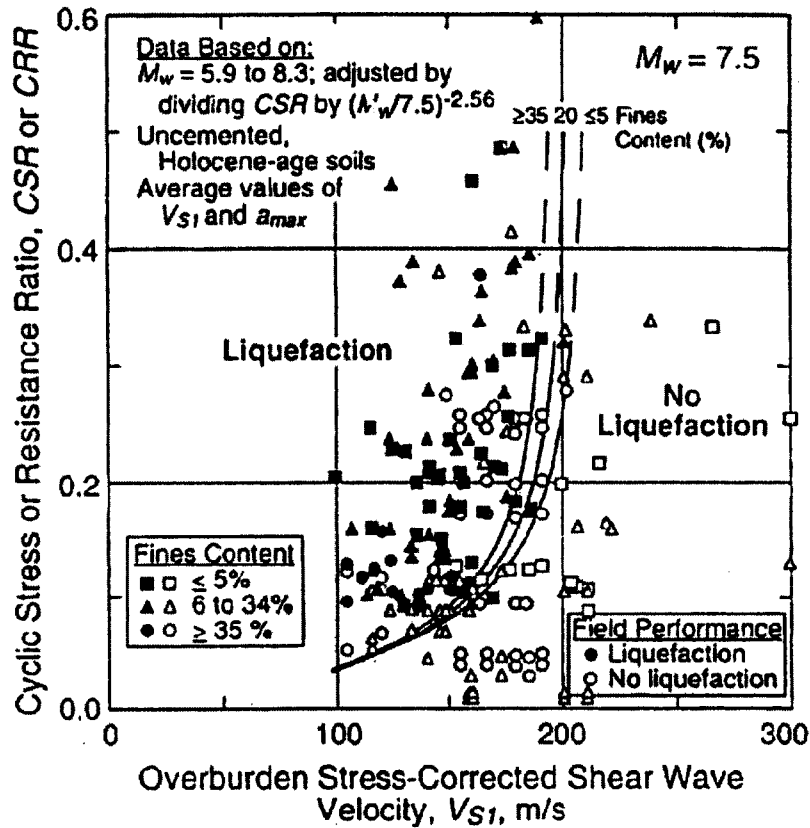


Figure 2.15: Potentiel de liquéfaction selon V_s [Youd et al., 2001]

2.5.3 Paramètres qui influent sur la vitesse des ondes de cisaillement des sols granulaires

Il découle du paragraphe ci-dessus que la vitesse d'onde de cisaillement (V_s) est très importante pour beaucoup d'applications dans le domaine de la géotechnique.

À cause de la relation directe qui lie la V_s d'un sol aux propriétés physiques de celui-ci, la vitesse des ondes de cisaillement est un paramètre fondamental dans la détermination des propriétés physiques du sol [Ethier, 2010]. En effet, la vitesse des ondes de cisaillement dépendante de l'indice des vides, la contrainte effective, les caractéristiques intrinsèques de sols (la granulométrie, la forme des grains, l'angularité, la dureté des grains et de la composition minéralogique). Dans les argiles, il est important de considérer l'histoire du chargement (la surconsolidation), la structure du sol c'est à dire l'arrangement des particules et la force interparticulaire qui influe aussi sur V_s .

A) *Le module de cisaillement des sols*

Dans la pratique de l'ingénieur, les caractéristiques dynamiques d'un sol sont données à très faible déformation par le module élastique G_{max} et la distorsion γ [Seed et Idriss 1970]. La vitesse des ondes de cisaillement est étroitement liée au module de cisaillement (G_{max}) par la formule 2.7 [Richart et al. 1970]. De ce fait, le G_{max} et ses variations en fonction de l'amplitude sont aussi conditionnés par plusieurs paramètres (les mêmes que V_s). Par exemple, pour les sols granulaires G_{max} est fonction de l'indice des vides, de la contrainte effective moyenne, des caractéristiques des grains, (forme, dimension, minéralogie et granulométrie).

Pour des sols cohérents, contrairement aux sols granulaires, il faut rajouter, le rapport de surconsolidation (OCR) qui renseigne sur l'histoire de chargement de l'argile, l'indice de plasticité (I_p) et la teneur en eau [Richart et al. 1970].

$$G_{max} = \rho \cdot (V_s)^2 \quad (2.7)$$

Étant donné que ce sont les propriétés élastiques du sol qui sont intéressantes, il est recommandé pour les mesures de G_{max} que les déformations induites au sol soient suffisamment petites pour que le comportement de ce dernier demeure dans le domaine élastique c'est-à-dire $\gamma \leq 10^{-3}\%$. Car au delà d'un certain déplacement, les déformations ne sont plus réversibles et le module de rigidité décroît. Il est donc très important que pour les méthodes de mesure en laboratoire d'imposer au sol un déplacement faible (à l'intérieur du domaine élastique) afin que la mesure de G_{max} ou V_s soit maximale.

B) *L'indice des vides*

L'indice des vides est défini comme étant la proportion de vide se trouvant dans un sol ou dans un échantillon de sol; Ceux-ci pouvant être comblés par l'eau ou par l'air. Les premières relations faisant intervenir V_s en fonction de l'indice des vides et la pression sont apparues dans les années 60 par Hardin et Richart (1963). Dans leurs travaux, ils développent des corrélations qui donnent $V_s = f(e)$ selon le type de sol en place et aussi selon la forme des grains. Quelques corrélations sont présentées dans le tableau 2.2 ci-dessous.

Tableau 2.2 : Relation pour évaluer V_s pour les sols granulaires

Auteurs	Type de sol	V_s (m/s)	Limites de e
Hardin et Richard (1963)	Sable à grains ronds	$\sqrt{\frac{2,17 - e}{\rho}}$	
	Sable de concassage	$1797 \sqrt{\frac{(2,97 - e)^2}{\rho(1 + e)}} \sigma'_m{}^{1/4}$	$0,6 \leq e \leq 1,3$
Robertson et coll (1995)	Sable à grains ronds	$1,2 - 2,0 \sqrt{e}$	

Avec

ρ masse volumique (kg/m^3)

σ'_m contrainte effective moyenne (kPa)

Des études ont aussi montrées que la vitesse des ondes de cisaillement augmente avec la diminution de l'indice des vides [Hardin et Richard (1963), Robertson et al. (1995)].

C) La granulométrie

La granulométrie d'un sol est un élément à prendre en compte dans tous les projets de caractérisation des sols. Il fait généralement référence à la composition du sol en ce sens qu'il renseigne sur les diamètres des particules de sol en place qui sont étroitement liés à l'indice des vides. En effet, la variation du diamètre des grains de sol fait varier dans un sens ou dans l'autre l'indice des vides. Le paramètre le plus intéressant à considérer ici est le diamètre moyen des grains (D_{50}).

D'après Ishihara, pour les sables, la variation de l'indice des vides [$e_{\max} - e_{\min}$] diminue avec l'augmentation du D_{50} . Celle-ci se stabilise pour les graviers ayant un $D_{50} > 5$ mm. Cependant, pour les sols granulaires ayant une grande proportion de fines (< 5 mm), cette variation de l'indice des vides est plus importante.

D) Le coefficient d'uniformité C_u

Il fait référence à la forme des grains de sol et à leur agencement dans le sol. En ce qui concerne l'agencement des grains dans le sol, il a une grande influence sur l'indice des vides qui comme vu à la section 2.5.3 (B) affecte la vitesse des ondes de cisaillement. En effet, une distribution étalée des grains fait que l'indice des vides soit faible par rapport à un sol qui a une distribution moins uniforme, donc une densité plus importante. Pour ce qui est de la forme, elle n'est pas très importante selon Hardin et Richart (1963). Ils affirment que le mouvement des particules aplaties augmente les points de contacts entre les particules et permet de ce fait de former des contacts additionnels qui conduisent à l'augmentation de la résistance au cisaillement.

2.5.4 Corrélations empiriques entre V_s (ou G_{max}) et les paramètres caractéristiques du sol

Le tableau 2.3 donne des relations empiriques qui ont été proposées par des chercheurs afin de déterminer la vitesse d'onde de cisaillement ou le module de cisaillement des sols granulaires en laboratoire. Ce dernier est fait en tenant compte de la condition du sol (sec ou saturé) et de la technique utilisée. Les principales méthodes sont les Bender éléments et la colonne de résonance.

Tableau 2.3 : Relations empiriques de détermination de Vs ou de Gmax en laboratoire (Patel et al. 2010)

État du sable	Techniques utilisées	Propriété du sable			Relations proposées $\sigma' (kPa); G (MPa); V_s (m/s)$	Références
		Noms	D_{50} (mm)	Cu		
Sec	Bender éléments	Sable d'Ottawa	0,5	1,2	$V_s = (120,9 - 59e) \cdot \sigma'^{0,25}$	De Alba 1984
		Sable de Silica	0,37	1,8	$V_s = 153,3 \cdot \sigma'^{0,23}$	Brocanelli et Rinaldi 1998
		Sable du Nevada	0,16	1,8	$V_s = 67,9 \cdot \sigma'^{0,25}$	Arulnathan et al. 2000
		Sable de Silica	0,32	1,26	$V_s = 91 \cdot \sigma'^{0,211}$	Ortiz 2004
		Sable de Silica	0,47	...	$V_s = 120 \cdot \sigma'^{0,12}$	Ismail et al. 2005
	colonne Résonnance	Sable d'Ottawa	0,5	1,2	$G = 700 \cdot \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} \cdot \sigma'^{0,5}$	Hardin et richard 1963
		Sable propre	0,55	<1,8	$G = 850 \cdot \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} \cdot \sigma'^{0,44}$	Iwasaki 1978
		Sable de Silica Sable fin	0,44 0,55	1,5 1,5	$V_s = \sqrt{\frac{G(1-S_r)^n}{\rho_w \cdot G_s \cdot (1-n^*) + \rho_w \cdot S_r}}$ $V_s = 78 \cdot \sigma'^{0,23}$	Cascante et santamaria 1996
		Sable moyen-fin	0,55	<1,8	$G = 2,75 \cdot \frac{(1,46 - e)^2}{1 + e} \cdot \sigma'^{0,21} \cdot 100^{0,58}$	Wichtmann et Triantafyllidis 2004

saturé	Bender éléments	Sable d'Ottawa	0,39	1,48	$G = 612. (100^{0,56}). \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} . \sigma'^{0,44}$	Salgado et al 2000
		Sable fin	0,1	2,22	$V_s = (91 - 44,6e). \sigma'^{0,23}$	Huang et al 2004
		Sable de Silica	0,47	...	$V_s = 78. \sigma'^{0,28}$	Ismail et al.2005
		Sable de Toyoura	0,22	1,33	$V_s = \sqrt{\frac{4786. \sigma'^{0,256} (1+e)}{G_s. e^{1,16}}}$	Mohsin et Airey 2005
		Sable de Toyoura	0,18	1,5	$G = 1255. e^{-0,18} . \sigma'^{0,56}$	Sahaphol et Mirura 2004
		Sable fin	0,34	2,69	$G = 2,121. \frac{(2,973 - e)^2}{1 + e} . \sigma'^{0,505}$	Zhou et Chen 2005
	Colonne de résonnance	Sable Fin - grossier	0,33	...	$V_s = (135 - 86,6. e). \sigma'^{0,25}$	Wei et al 1996
		Sable fin	0,16	1,68	$V_s = (68,5 - 65,5e). \sigma'^{0,25}$	Chien et oh 2000

Tableau 2.3 Relations empiriques de détermination de Vs ou de Gmax en laboratoire (suite)

n* porosité qui peut aussi s'exprimer en fonction de l'indice des vides e

ρ_w masse volumique de l'eau (kg/m³)

À partir des formules du tableau 2.3, les courbes $V_s = f(e)$ récapitulatives des ces formules ont été tracées. Une contrainte moyenne effective de 100 kPa et différents fuseaux de variation du diamètre médian D_{50} ont été pris en considération. Ces courbes montrent les différences et ou les similarités sur la variation de la vitesse d'onde de cisaillement en fonction de l'indice des vides.

La figure 2.16 correspond à un D_{50} compris entre 0,1 et 0,22 mm ; dans la figure 2.17, D_{50} varie entre 0,32 et 0,39 mm.

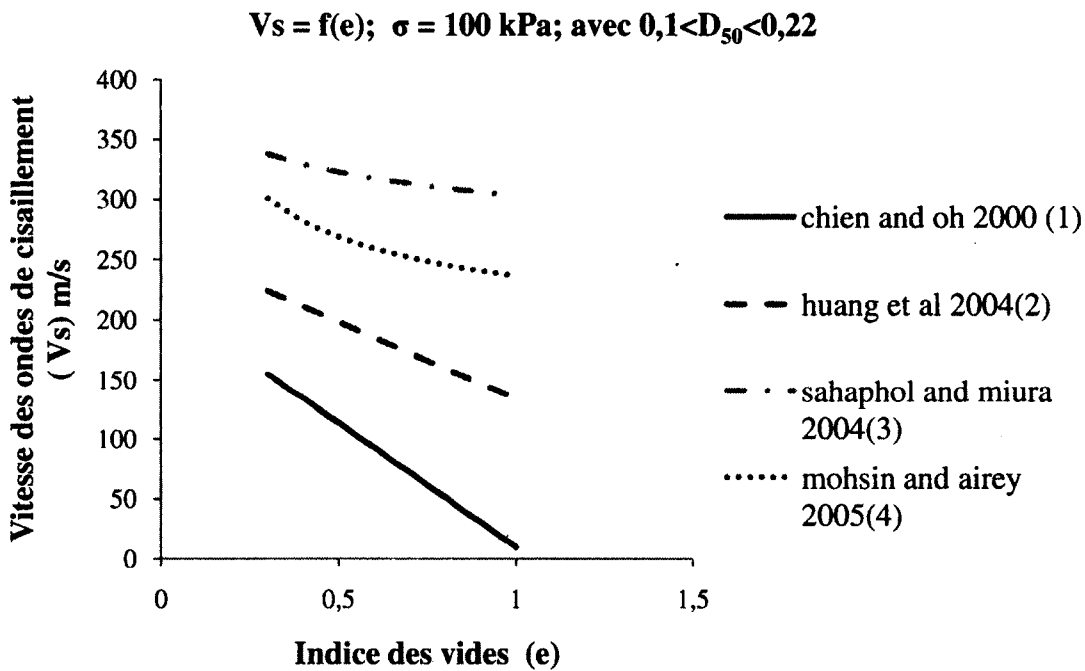


Figure 2.16: Variation de V_s en fonction de l'indice des vides ($0,1 < D_{50} < 0,22$)

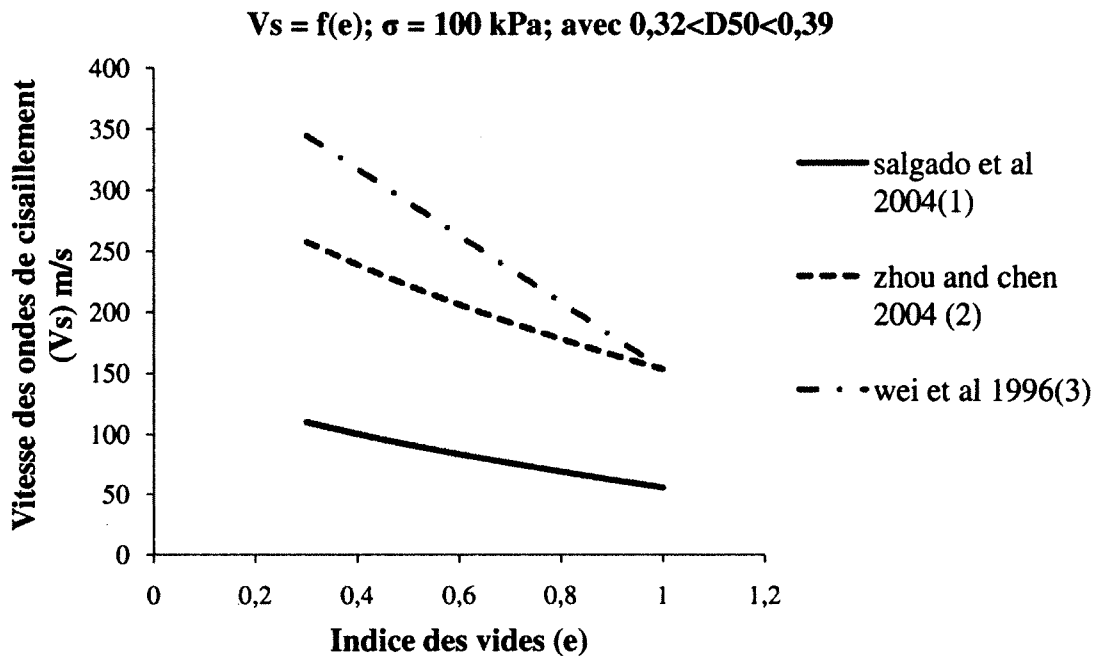


Figure 2.17: Variation de V_s en fonction de l'indice des vides ($0,32 < D_{50} < 0,39$)

Synthèse de la littérature et opportunités de recherche

De la revue bibliographique, il ressort une multitude de corrélations qui donnent V_s en fonction des différents paramètres qui permettent la caractérisation des sols. En effet, des différences notoires ressortent dans ces formules. Selon qu'on utilise un sable, un gravier ou un caillou, ou alors selon que le D_{50} varie ou encore selon la méthode de détermination de V_s , les formules utilisées sont différentes.

Dans la suite de ce mémoire, on verra s'il n'existerait pas une relation directe [$V_s = f(D_{50}, Cu, e, \sigma')$] qui lierait V_s et les caractéristiques intrinsèques du sol (le diamètre moyen D_{50} , le coefficient d'uniformité Cu , l'indice des vides e et la contrainte effective σ' et qui permettra à partir de V_s de caractériser ou de déterminer les propriétés d'un matériau granulaire ou d'un sol. Nous aurions plus plusieurs graphes ou fonctions, mais une fonction unique (Figure 2.18).

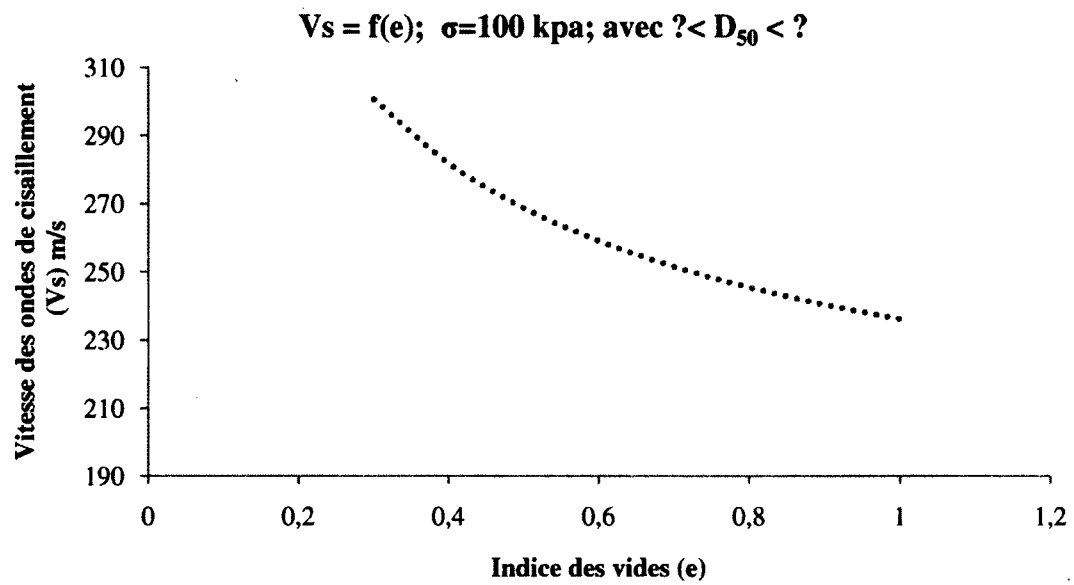


Figure 2.18: Variation de V_s en fonction de l'indice des vides pour un D_{50} donné.

CHAPITRE 3 : DESCRIPTION DU MONTAGE ET DES ÉQUIPEMENTS

3.1 GÉNÉRALITÉS

La section 2.3 de la synthèse bibliographique, il a été recensé quelques techniques pour la mesure des propriétés des sols à des petites déformations, soit la mesure de V_s in situ et en laboratoire.

En ce qui concerne les techniques de mesure de la vitesse des ondes de cisaillement en laboratoire, il apparaît que l'utilisation des « Bender éléments » est le moyen le plus intéressant, car les éléments piézoélectriques ont l'avantage d'avoir des dispositifs adaptés du fait de leur simplicité et de la facilité qu'ils ont à être installés dans la majorité des équipements de mécanique des sols classiques qui servent généralement pour la mesure de V_s . Depuis le développement de cette technique "*Bender-élément*", les chercheurs ne cessent de travailler sur l'amélioration des méthodes de traitement des signaux pour l'obtention de la vitesse des ondes de cisaillement avec la plus grande précision possible car, pour une même mesure de V_s , on a souvent des résultats très différents. Ces dissimilitudes sont très souvent liées au manque de modélisation, au désaccord existant sur l'équipement, au mode opératoire et à l'interprétation des signaux.

Le montage utilisé tient compte des trois aspects principaux préconisés par Ethier, (2010):

1. L'appareil utilisé doit être un appareil de consolidation oedométrique conventionnel équipé de dispositifs de mesure de V_s . Il doit permettre, en même temps, la réalisation d'un essai de consolidation.
2. Les éléments piézoélectriques doivent être disponibles sur le marché et être adaptables dans une cellule oedométrique conventionnelle.
3. Les éléments piézoélectriques doivent permettre de favoriser la clarté des signaux émis et reçus, notamment en simplifiant l'émission en s'approchant de l'application d'un cisaillement parfait et en minimisant les réflexions.

3.2 Description générale du montage

La Figure 3.1 donne un aperçu général du montage. L'échantillon est mis en place dans une cellule oedométrique équipée d'éléments piézoélectriques encastrés dans le piston et dans sa base. Ces éléments piézoélectriques sont destinés à agir respectivement comme émetteur et récepteur de signal. Ces derniers prennent la forme d'un anneau lors de la réalisation de l'essai. Le montage comprend un générateur de signal relié à l'anneau piézoélectrique émetteur. Entre la génération du signal et l'émetteur, un amplificateur de la puissance du signal est utilisé. L'anneau piézoélectrique récepteur est quant à lui relié à un oscilloscope. Au besoin, un amplificateur de l'amplitude du signal est utilisé entre le récepteur et l'oscilloscope. La cellule oedométrique, équipée des anneaux piézoélectriques a été utilisée dans un appareil de consolidation conventionnel à chargement manuel, de marque M&L Testing. Cet appareil de marque Wykeham Farrance eng est muni d'un cadran qui permet la lecture des déflexions avec une précision de 0,0001 pouce (2,54 μm) [Éthier, 2010].

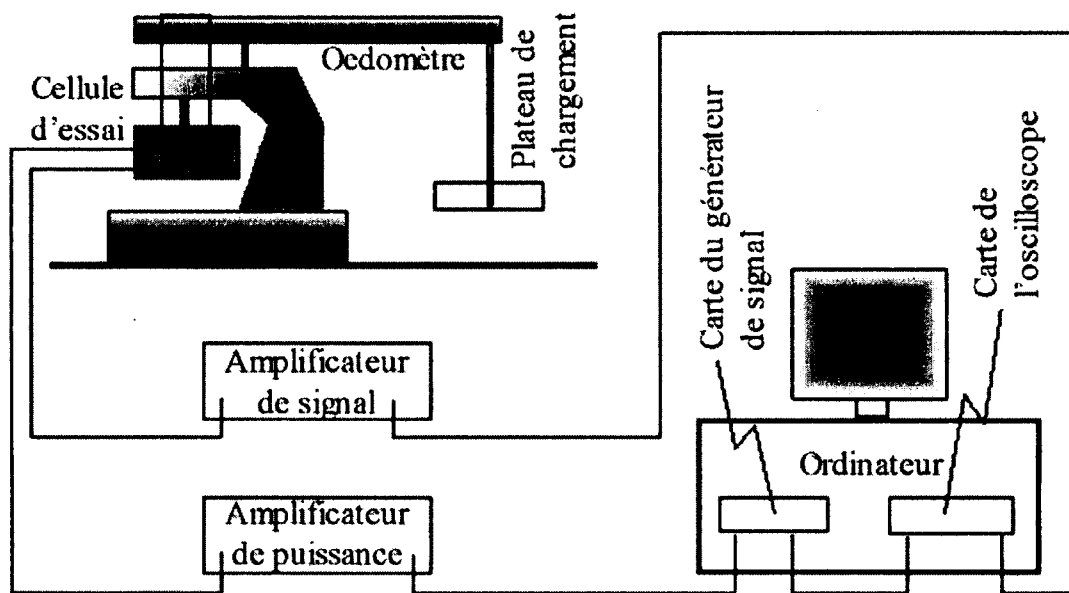


Figure 3.1 : Aperçu général du dispositif expérimental [Éthier, 2010]

Les paragraphes suivant donnent un détail sur les éléments principaux de ce montage.

3.3 Le dispositif des anneaux- piézo-électriques

Pour surmonter les difficultés rencontrées lors des essais au moyen des bilames piézo-électriques, il a été développé à l'Université de Sherbrooke un dispositif d'anneau piézo-électrique encore appelée ring-actuator [Gamal El Dean, 2007; Éthier, 2010]. En effet, ce dispositif permet non seulement la mesure de V_s au laboratoire mais aussi, une meilleure interprétation des résultats. Tout comme les bilames, le dispositif des anneaux piézo-électriques se caractérise par la facilité qu'il a à être monté sur différents appareils de géotechnique comme les cellules oedométriques, les cellules triaxiales et autres.

3.3.1 Description

L'élément piézo-électrique est un anneau constitué d'un matériau inerte. Ces faces, intérieures et extérieures sont couvertes d'une mince couche conductrice. La Figure 3.1 illustre le principe de fonctionnement des anneaux piézo-électriques. En effet, les faces sont soudées à un fil électrique qui permet d'envoyer un voltage d'une durée finie selon la forme désirée. Ce potentiel électrique permet à l'anneau de se déformer radialement dans un sens ou dans l'autre. L'insertion, par le biais d'un époxy, d'une pierre poreuse à l'intérieur de l'anneau permet à celle-ci de créer un cisaillement lorsqu'elle est placée à la surface du sol qui peut être mesuré de la même manière par un anneau récepteur. Il est à noter que les anneaux peuvent être de différentes tailles (diamètres) [Challouf, 2010].

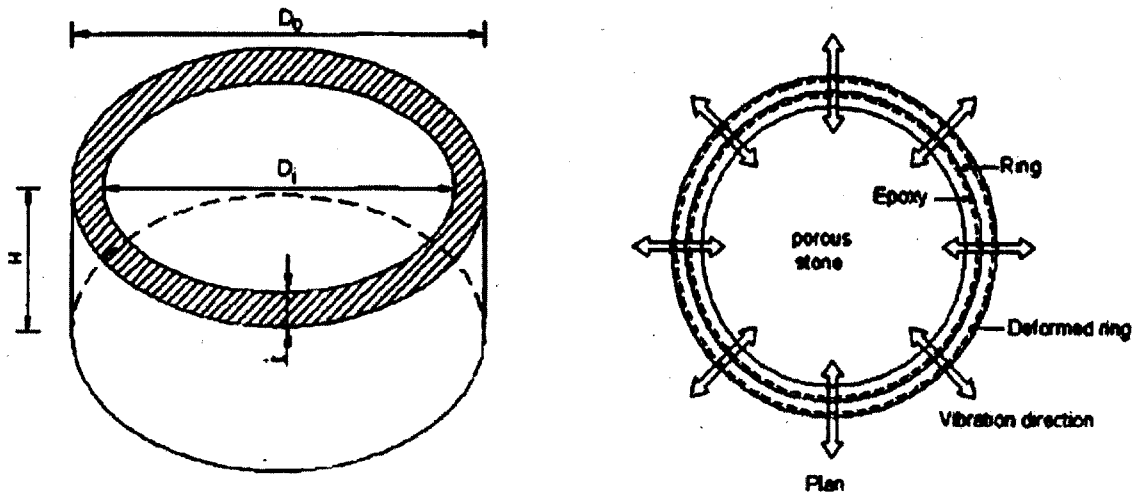


Figure 3.2 : Principe de fonctionnement des anneaux piézo-électriques

3.3.2 Avantages des anneaux piézo-électriques

Les avantages principaux de l'utilisation des anneaux sont les suivants :

- Apporter des améliorations au niveau de la réalisation des essais, de leurs champs d'application et de l'interprétation des résultats
- La particularité du contact entre les capteurs émetteur et récepteur d'onde avec l'échantillon du sol. Ces derniers sont noyés à l'intérieur des pierres poreuses supérieure et inférieure,
- Le contact avec l'échantillon du sol évite l'intrusion ou la pénétration des capteurs qui présente certains inconvénients,
- Les intrusions ou remaniement sont évités pour l'échantillon du sol.
- La disposition des capteurs permet d'avoir une émission plus uniforme qu'un bilame piézo-électrique, ainsi qu'une énergie de l'onde de compression beaucoup plus faible.

3.4 La cellule oedométrique

La cellule oedométrique utilisée s'apparente à celle d'une cellule oedométrique standard. Elle a été conçue de façon à permettre l'insertion d'un anneau piézoélectrique émetteur au niveau du piston, et l'insertion d'un anneau piézoélectrique récepteur au niveau de la base (Figure 3.3). Il s'agit d'un type de cellule qui permet le drainage des deux faces de l'échantillon et qui utilise,

pour contenir l'échantillon, un anneau oedométrique rigide de 63,5 mm de diamètre et de 19 mm de hauteur [Éthier, 2010].

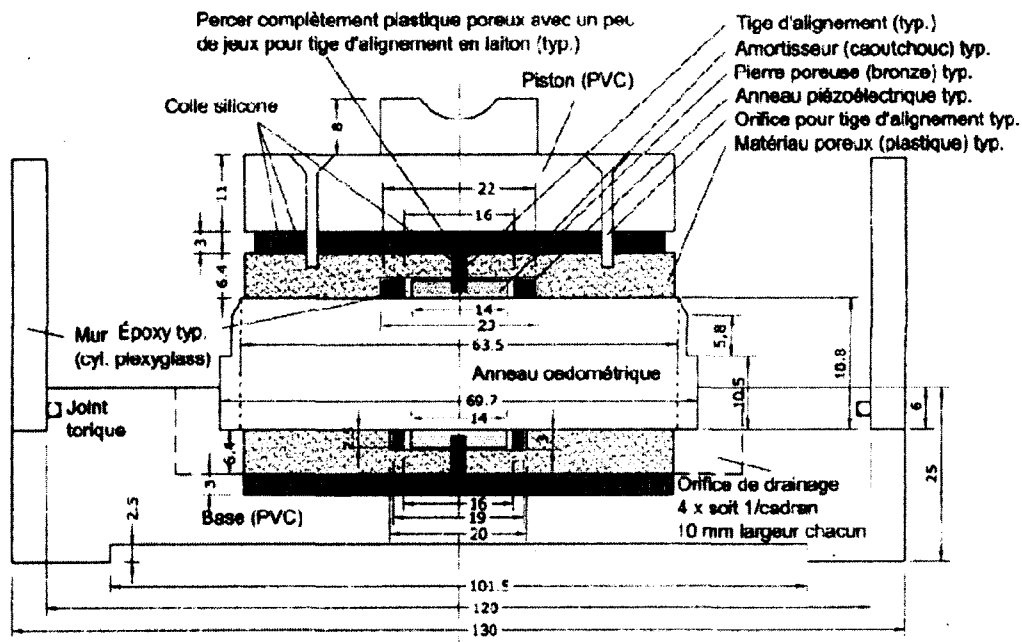


Figure 3.3 : Cellule oedométrique [Éthier, 2010]

La Figure 3.4 Illustration une cellule oedométrique à l'intérieure de laquelle est placée le dispositif d'anneaux piézoélectriques.

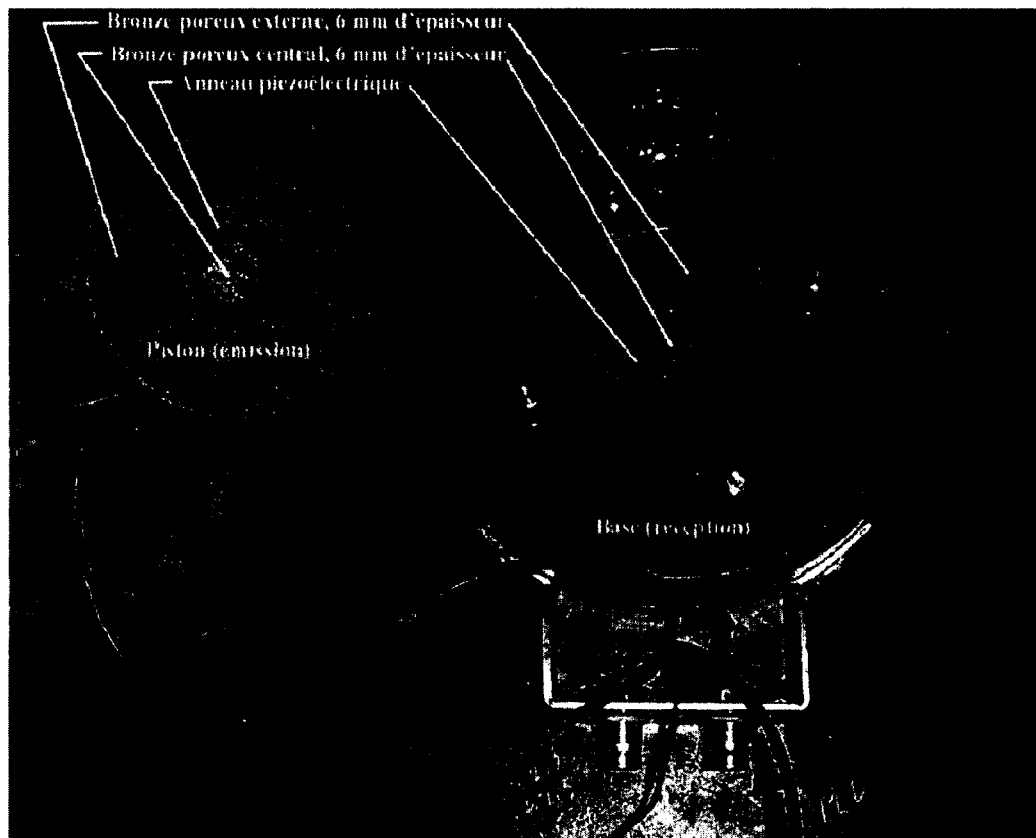


Figure 3.4: Dispositif d'anneaux piézo-électriques dans une cellule oedométrique [Éthier, 2010].

3.5 Type d'onde émise

La forme de l'onde émise influence l'étendue de la réponse en fréquence (Figure 3.5). Une onde carrée contient une plus large bande de fréquence qu'une onde sinusoïdale. Par contre, une onde sinusoïdale continue contient une bande de fréquence très restreinte. La forme de l'onde émise a une grande influence sur l'importance de l'onde de compression qui est générée lors de l'émission de l'onde de cisaillement.

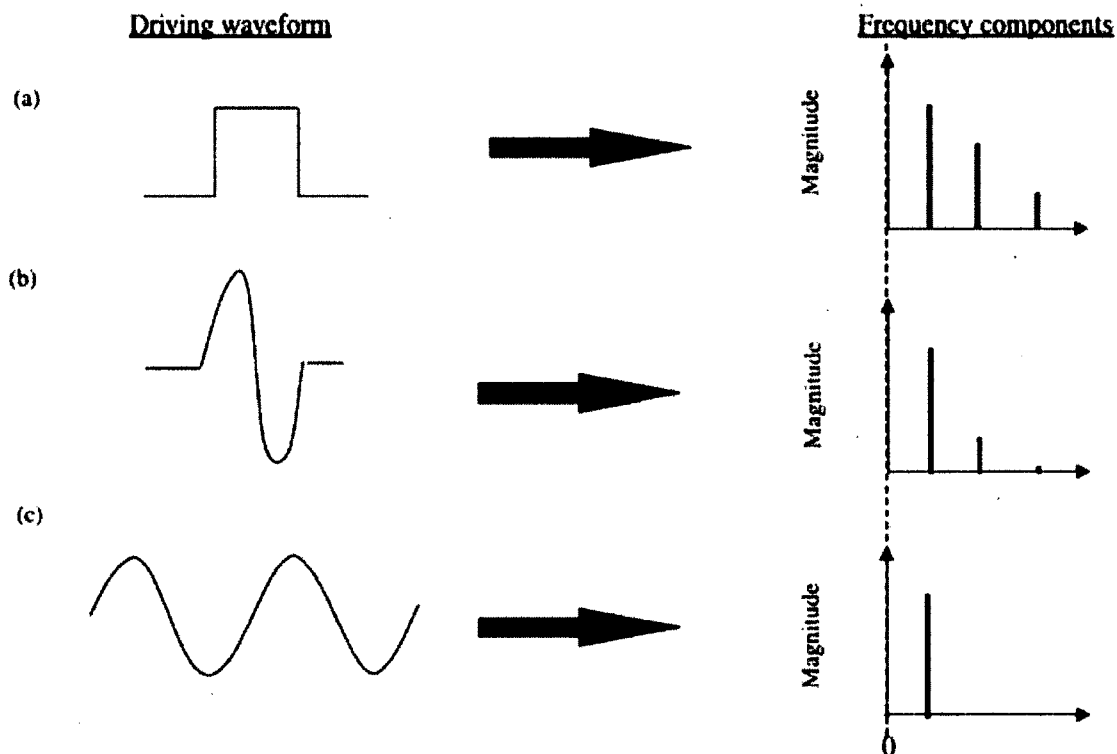


Figure 3.5 : Illustration de différentes formes d'ondes. a) onde carrée b) onde sinusoïdale à un cycle et c) onde sinusoïdale continue [Blewett et al. 2000].

Les impulsions qui sont des efforts appliquées à la face extérieure de l'anneau piézo-électrique émetteur sont relativement courtes pour diverses simulations. Les impulsions considérées sont des demi sinus (ou rectangulaire). Ces impulsions correspondent à des fréquences très élevées ; de l'ordre de 14 KHz.

3.6 Les points de mesures

La Figure 3.6 montre les différents points de mesure considérés. En effet, il est possible de suivre la variation de la vitesse des ondes de cisaillement en plusieurs points dans un échantillon de sol. Dans le cadre de ce projet, il a été considéré les déplacements émis et reçus au niveau des points suivants (Figure 3.6) :

- 1- Le point choisi au niveau de l'émetteur est à l'intérieur de l'anneau près de l'interface avec le sol

2- En ce qui concerne le récepteur, les points choisis sont deux points à l'intérieur de l'anneau récepteur (un proche de l'interface sol anneau et l'autre proche de la face de l'anneau)

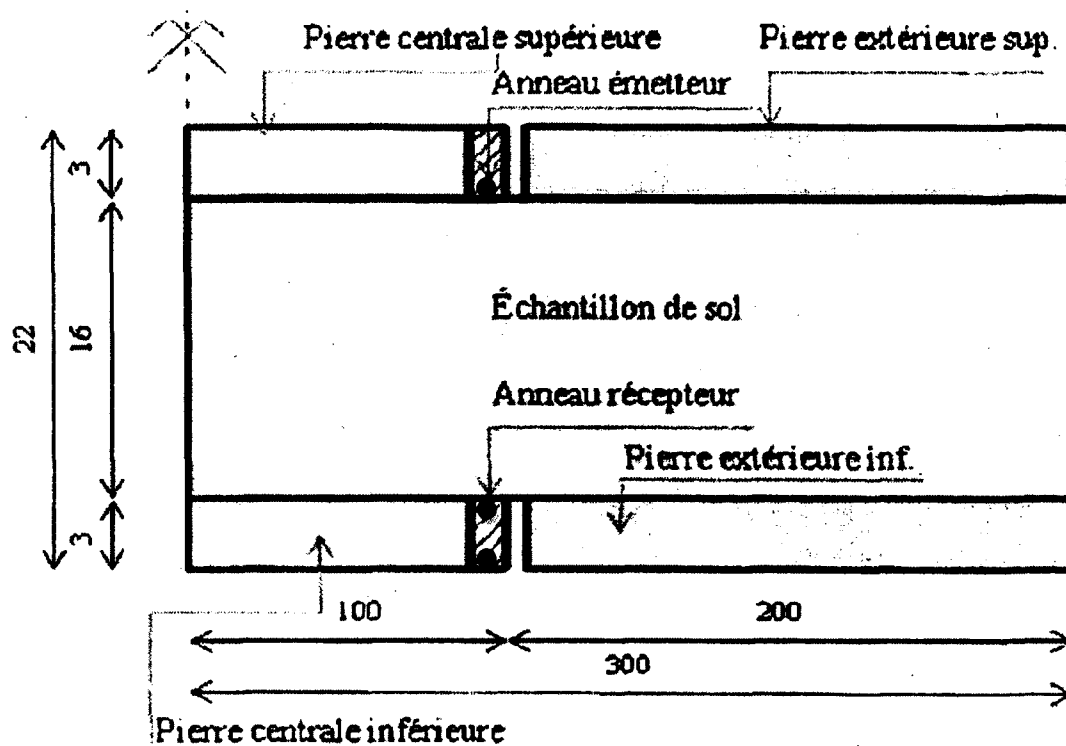


Figure 3.6 : Cellule oedométrique équipée d'un dispositif d'anneau piézoélectrique avec les points servant pour le suivi de la variation de V_s .

3.7 Le modèle utilisé pour le traitement des signaux

Le modèle à configuration bidimensionnelle est celui qui est utilisé pour le traitement des signaux. En effet, il prend en compte un taux d'amortissement augmenté de 2%. Cette augmentation est faite dans le but de mieux atténuer la réponse des capteurs.

La Figure 3.7 laisse entrevoir que dans ce modèle de configuration, les signaux obtenus aux points 1 et 2 sont identiques. De plus, l'arrivée de l'onde de cisaillement est facilement identifiable. Ces résultats montrent que le dispositif de l'anneau piézo-électrique développé à l'Université de Sherbrooke permet d'avoir des signaux très peu affectés par des ondes de compression ou des ondes réfléchies.

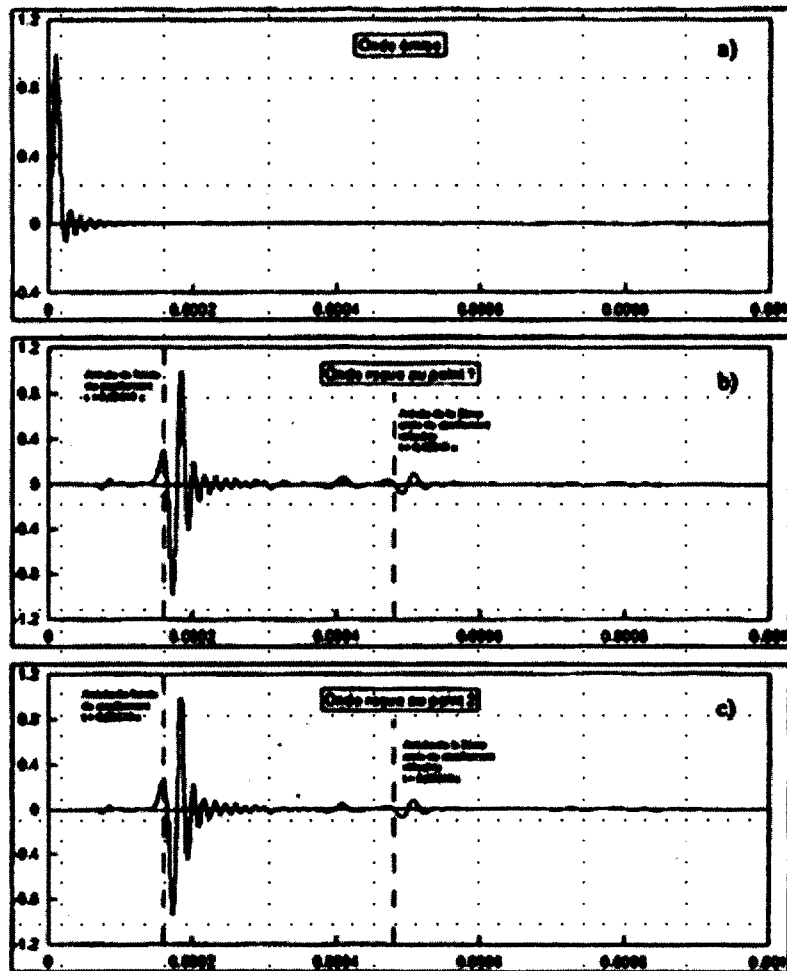


Figure 3.7 : Illustration du déplacement déterminé à l'interface sol-émetteur et celui déterminé aux deux points de l'anneau piézoélectrique- déplacement obtenu à partir de la configuration bidimensionnelle.

3.8 Déphasage induit par les capteurs

Le déphasage induit par les capteurs est donné par l'équation (3-2) Ceci suppose alors que la fréquence de résonance est connue ainsi que le taux d'amortissement du système.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2D \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)}{1 - \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)} \quad (3.1)$$

L'interprétation des signaux obtenus au laboratoire avec un dispositif piézo-électrique ne peut se faire sans tenir compte de ce déphasage qui en réalité peut être traduit par un temps de retard [Challouf, 2009]. Ce temps de retard est la principale source d'erreur ou d'imprécision dans l'évaluation de Vs en laboratoire.

$$t_{\text{retard}} = 2\pi\theta/\omega \quad (3.2)$$

La Figure 3.8 illustre les fonctions de déphasage déterminées à partir des signaux simulés et correspondent parfaitement à l'équation (3.2) obtenue théoriquement. En pratique, il est possible de définir ce type de fonction par la réalisation d'essais émetteur sur récepteur en appliquant les charges désirées.

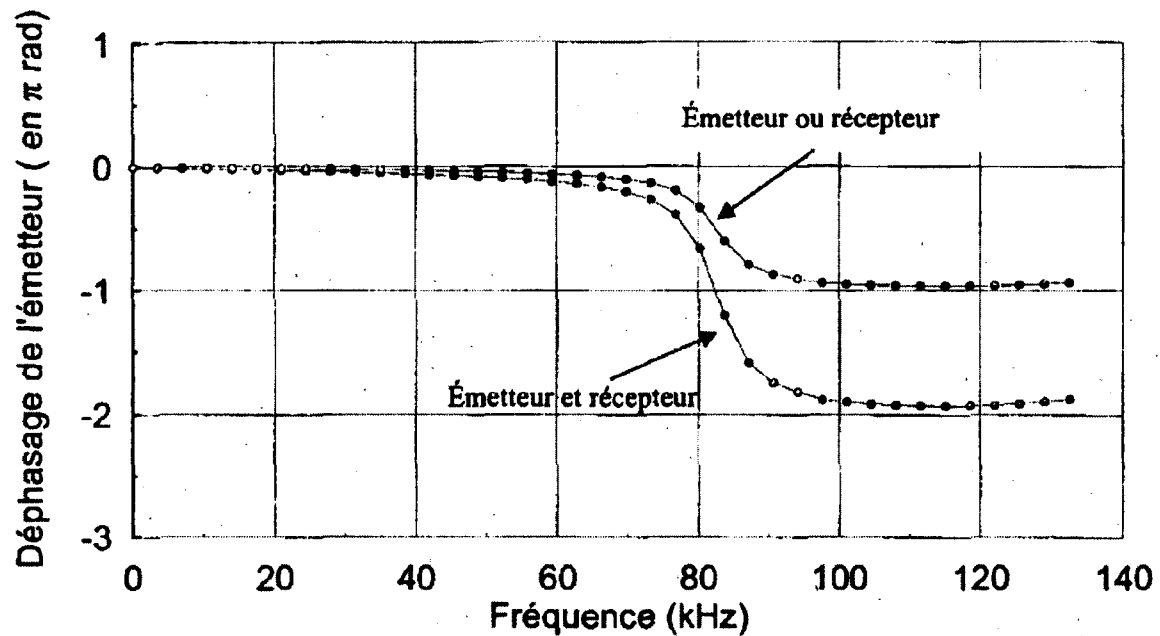


Figure 3.8: Illustration du déphasage du système émetteur récepteur en fonction de la fréquence.

Dans le domaine temporel, l'interprétation de l'arrivée d'une onde est très difficile. Pour ce faire, il est nécessaire d'examiner la variation de la vitesse en fonction de la fréquence (courbe de dispersion). Connaissant la courbe de correction de phase du système émetteur récepteur, il est ainsi possible de corriger la courbe de dispersion qui devrait être constante si on admet que le sol ne produit aucune dispersion.

3.9 Interprétation des signaux

Pour interpréter les signaux des simulations numériques, Karray, (2008) a réalisé un programme. Ce dernier prend en compte le déphasage des capteurs avec le sol permet le calcul de la courbe de dispersion à partir des signaux émis et reçus rend en compte la dispersion. Les Figure 3.9 et 3.12 présentent quelques exemples de résultats obtenus à partir de ce programme

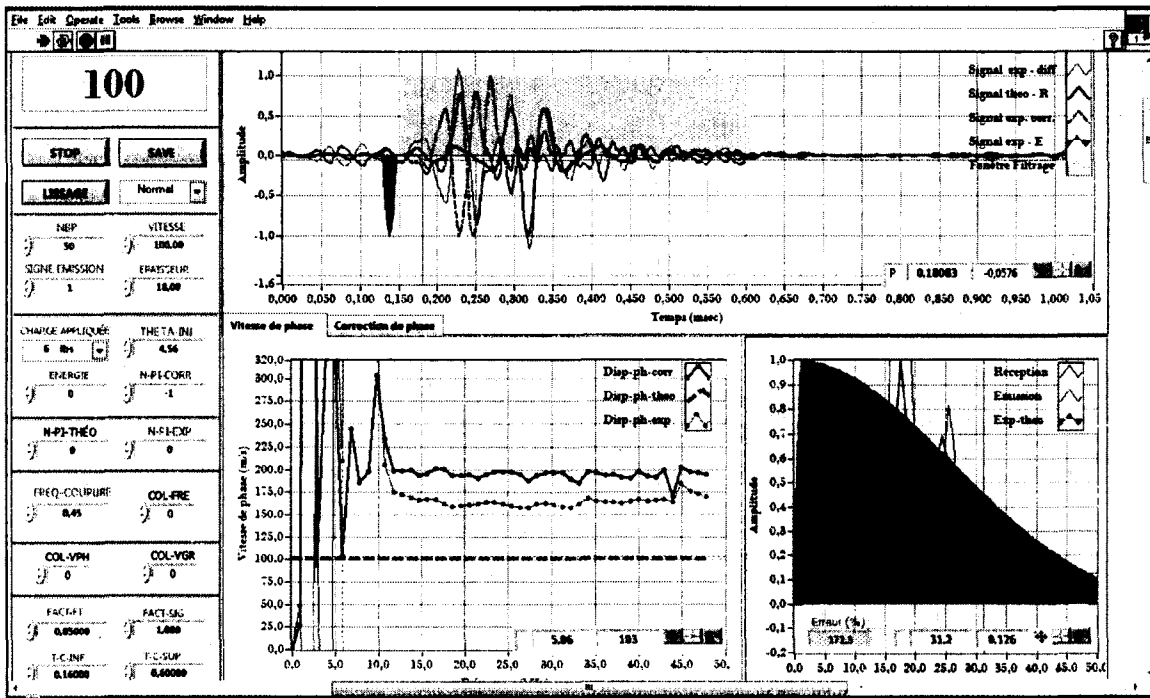


Figure 3.9 : Exemple de courbe de dispersion (vitesse de phase en fonction de la fréquence) sans correction et avec correction.

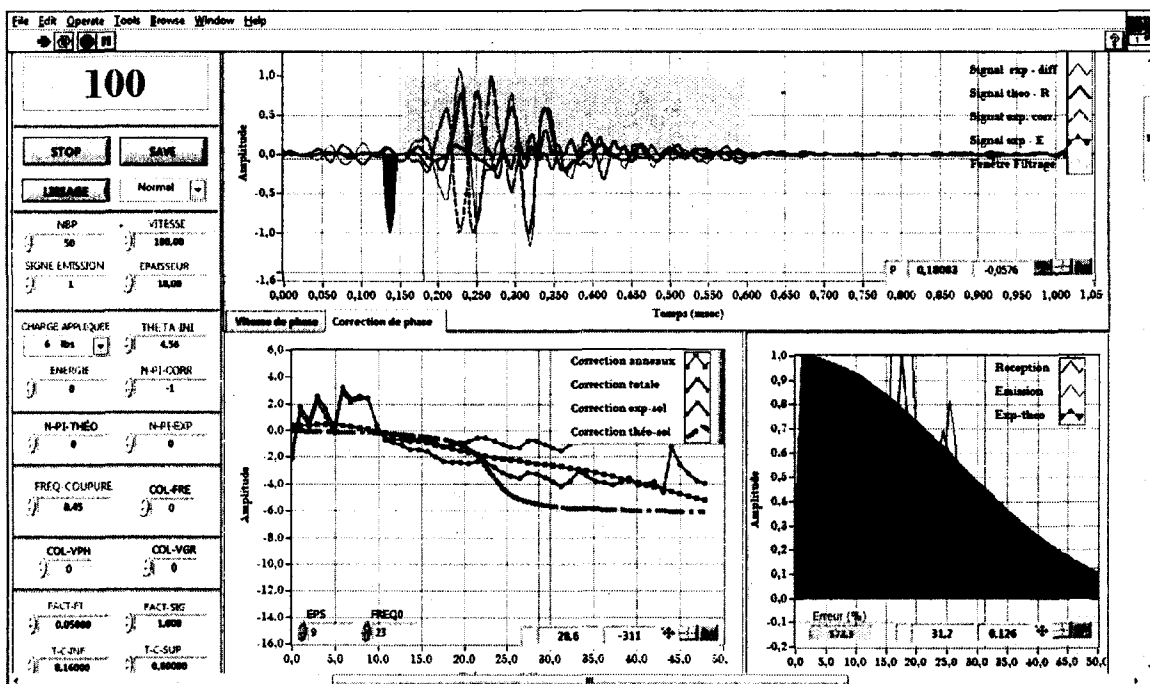


Figure 3.10 : Exemple de courbe de correction émetteur-récepteur et sol

CHAPITRE 4 : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET DESCRIPTION DES MATÉRIAUX

4.1 Introduction

Dans le chapitre 3, la description, les modes de fonctionnement du montage ainsi que les équipements qui vont servir à l'avancement de cette étude ont été entamés. Ce chapitre va définir les caractéristiques des différents sols granulaires qui seront utilisés. Les détails seront donnés sur les paramètres qui serviront à la réalisation de l'essai oedométrique et de l'essai numérique avec les anneaux piézoélectriques. En l'occurrence, la fréquence, les charges prises en compte pour l'essai oedométrique, la gamme de diamètre moyen des particules de sols retenues et aussi tous les paramètres importants qui permettent la caractérisation des sols. Ceux-ci seront définis dans le but de bien répondre aux objectifs de ce projet de recherche.

Les principaux objectifs de cette étude sont les suivantes :

- 1- Déterminer les valeurs de la vitesse des ondes de cisaillement (V_s) des sols granulaires au moyen de la technique ring actuator;
- 2- Valider l'efficacité de la méthode d'interprétation décrite dans le chapitre 3. Il s'agira de déterminer les corrélations entre les valeurs du module oedométrique obtenues avec l'essai oedométrique (E_{oed}) à celles du module cisaillement G_{max} obtenue avec les anneaux piézoélectriques.
- 3- Observer l'effet des éléments caractéristiques des sols granulaires (D_{50} , e , C_u, σ_m) sur la vitesse des ondes de cisaillement.

L'organigramme présenté à la Figure 4.1 présente de manière sommaire les étapes de notre programme expérimental.

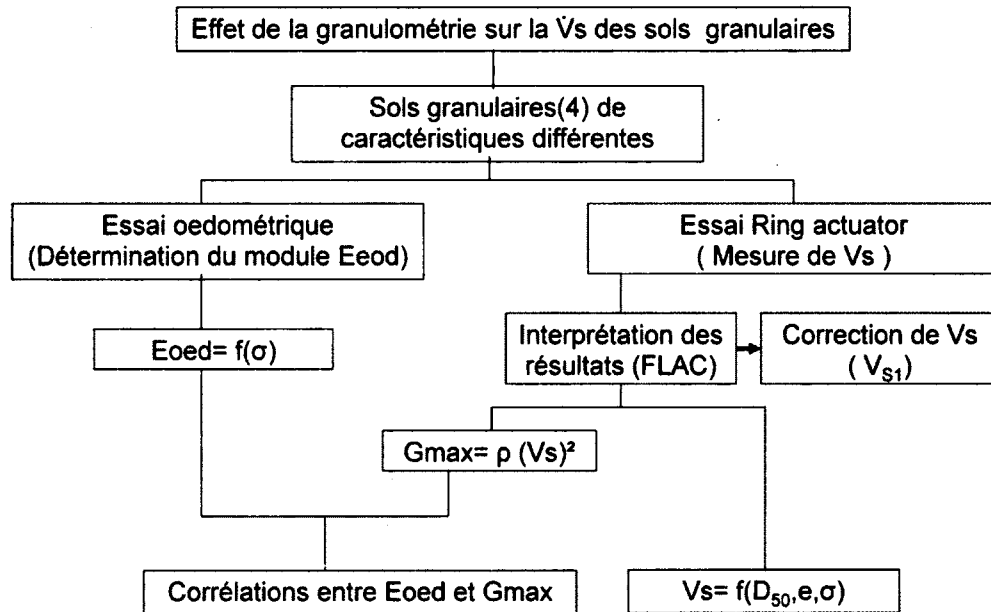


Figure 4.1 : Récapitulatif du programme expérimental

4.2 Procédure expérimentale

Le travail en laboratoire a consisté à réaliser des essais œdométriques conventionnelles au moyen d'une cellule équipée d'un dispositif d'anneaux piézo-électriques pour la mesure de la vitesse des ondes de cisaillement. Le système est relié à un ordinateur via une carte d'acquisition des données et un générateur d'onde.

4.2.1 Essai oedométrique

L'essai oedométrique est réalisé de la même manière qu'un essai oedométrique conventionnel. La seule différence est au niveau de la cellule qui comporte des capteurs qui permettent de réaliser simultanément l'essai de mesure de Vs avec les anneaux piézoélectrique.

Les valeurs de charges utilisées pour ces essais sont répertoriées dans le Tableau 4.1.

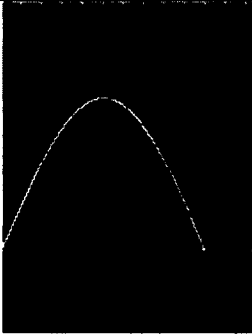
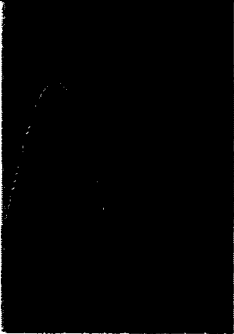


Tableau 4.1 : Valeurs de charges utilisées pour les essais

Charges au chargement (lb)	1/8	1/4	1/2	1	2	4	6	10	15	20	30	45
Charges au déchargement (lb)												

4.2.2 Ring-actuator ou anneaux piézoélectriques

Le principe est le suivant. Au préalable, il faut définir l'onde à émettre, ensuite, envoyer cette dernière à l'amplificateur de puissance qui, à son tour, l'envoi à l'émetteur piézo-électrique branché sur la cellule oedométrique. Cette onde est enregistrée au même moment que le signal produit par le récepteur après réception des ondes élastiques provenant du sol. La Figure 4.2 illustre un exemple d'enregistrement obtenu à partir d'une fréquence donnée. Les fréquences utilisées sont dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Fréquences prises en compte dans l'essai

Fréquence en (KHz)	12,5	25	50	100
Forme de l'onde générée				

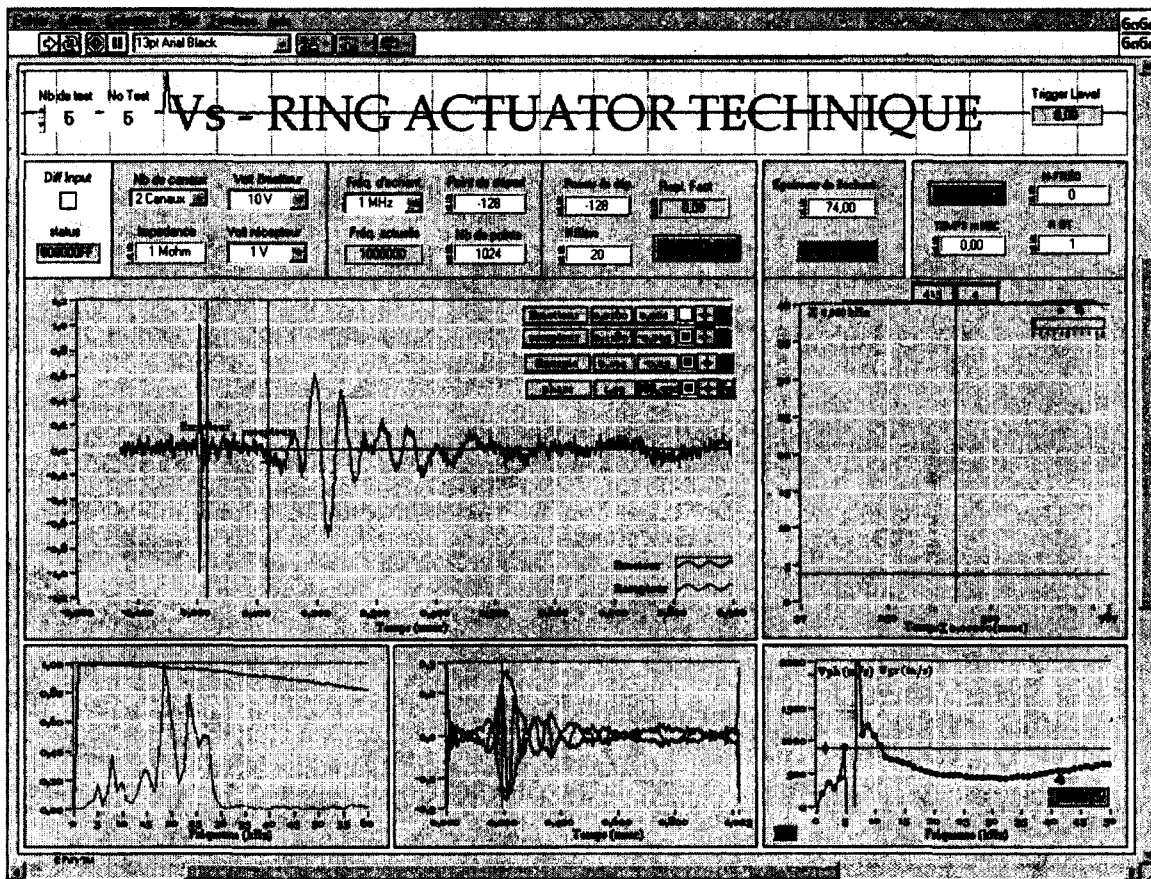


Figure 4.2 : Exemple d'enregistrement obtenu avec les anneaux

4.3 Description des matériaux utilisés

Dans le cadre de cette recherche, quatre (4) types de sols granulaires ont été utilisés. Il s'agit principalement du sable d'Ottawa, du sable de Milby, du sable d'Eastman et du Till d'Eastman. Le choix de ces sols granulaires est fait en vue de couvrir une large gamme de diamètre médian D_{50} des particules. La portion de sol utilisée est celle dont le diamètre est inférieur à 5 mm. La description détaillée de ces sables est faite ci-après.

4.3.1 Le sable d'Ottawa

On peut voir sur la Figure 4.3 que le sable d'Ottawa est un sable de couleur grise. La taille maximale de ses grains est de 1 mm. Ce sable présente une courbe granulométrie uniforme comme le montre la Figure 4.4. Outre ses particules qui sont arrondies ou semi - arrondies, il a aussi la particularité d'être très propre. La courbe granulométrique révèle une valeur du D_{50} de

0,37 mm. Le coefficient d'uniformité (C_u) après calcul donne une valeur de 1,96. Le coefficient de courbure (C_c) est de 1,23. Le récapitulatif de toutes ces valeurs est présenté dans le



Figure 4.3 : Sable D'Ottawa

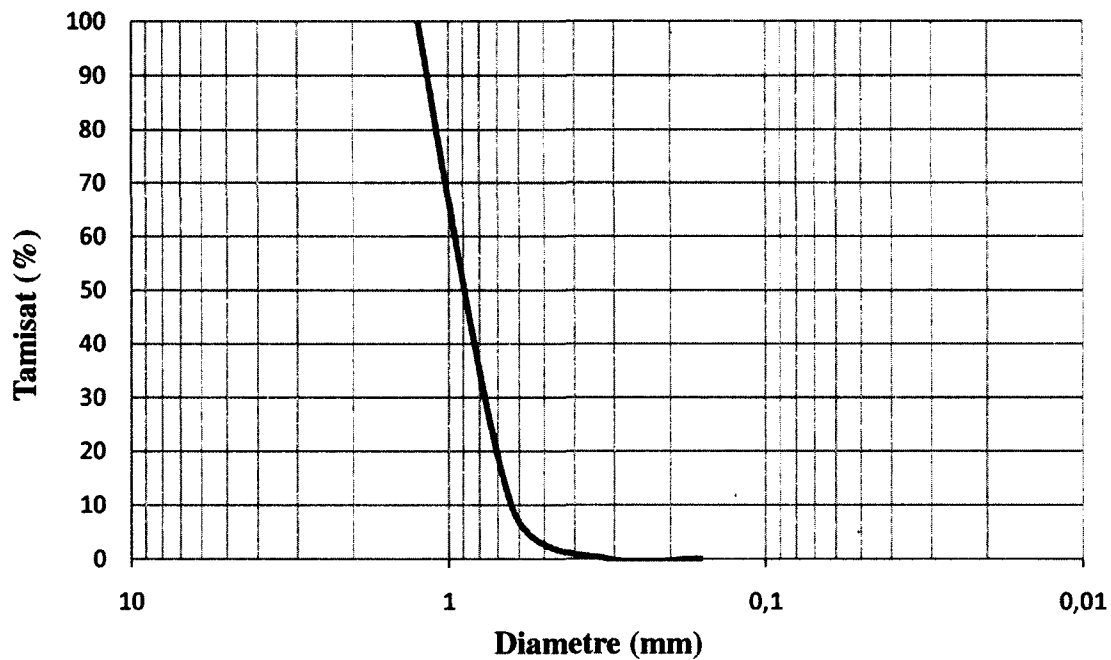


Figure 4.4 : Coubre granulométrique du sable d'Ottawa C-190

4.3.2 Le sable Milby

Le sable de Milby est de couleur grise (Figure 4.5). Il a la particularité d'être un sable très fin son module de finesse est proche de 1. En effet, son coefficient d'uniformité tourne autour de 3,2 et coefficient de courbe autour de 1,2. La Figure 4.6 donne la courbe granulométrique.

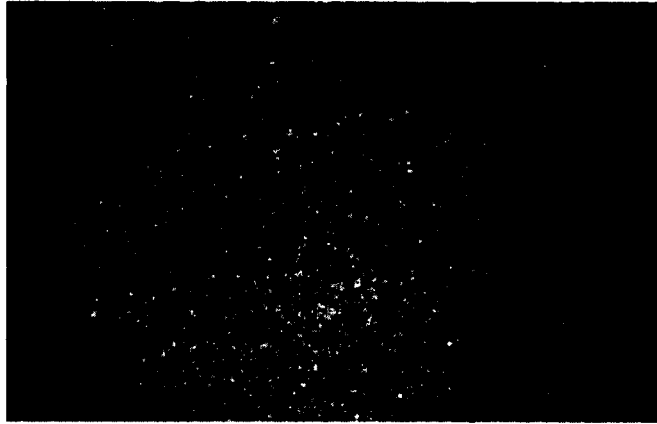


Figure 4.5 : Sable de Milby

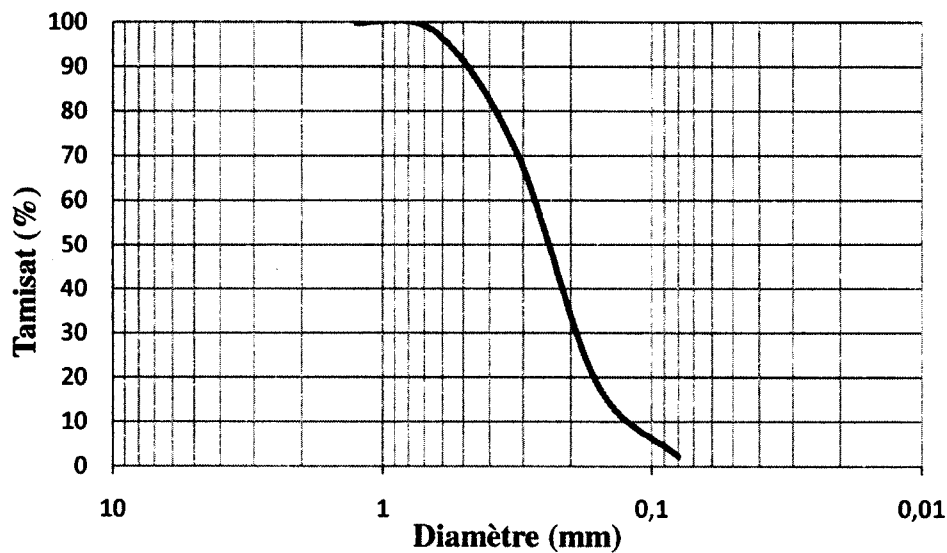


Figure 4.6 : Courbe granulométrique du sable de Milby

4.3.3 Le sable d'Eastman (EM)

Le sable EM quant à lui est un sable graveleux de couleur jaunâtre (figure 4.7). Le pourcentage de gravier dans ce sable est de 30%. La courbe granulométrique de ce dépôt de sol est illustrée à Figure 4.8. Le diamètre des grains varie entre 80 mm et 80 μ m. Sa courbe granulométrie est très étalée car le coefficient d'uniformité C_u est de 11,05 et celui de courbure C_c est de 0,70. Ces valeurs sont données à titre récapitulatif dans le tableau 4.3



Figure 4.7 : Sable Eastman (EM)

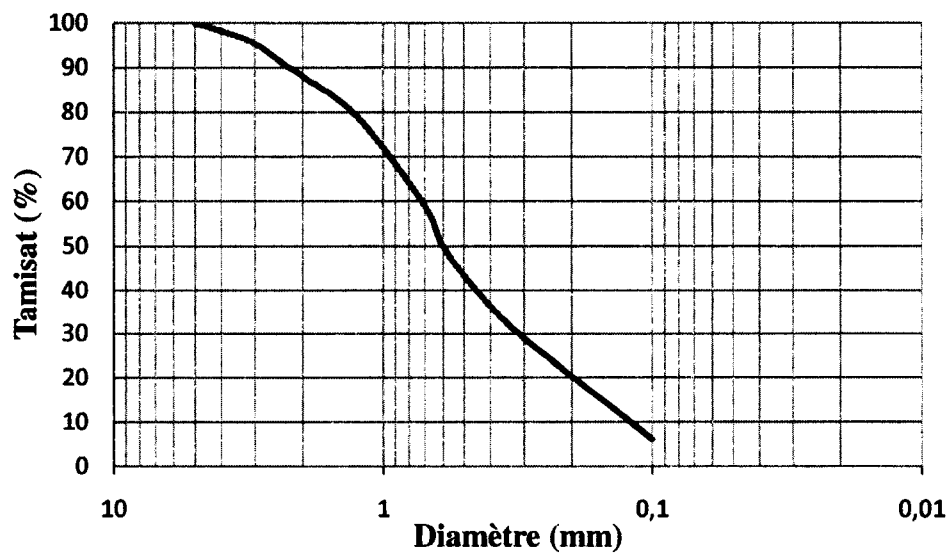


Figure 4.8 : Courbe granulométrique du sable Eastman (fraction de $d < 5\text{mm}$)

4.3.4 Le Till d'Eastman (EM)

Ce sol, tout comme le précédent, présente une granulométrie très étalée. En effet, son coefficient d'uniformité C_u est de 22 environ. Le coefficient de courbure C_c est de 2,5. Il a une couleur grise et le diamètre des grains de ce dépôt varie entre 65 mm et 1,5 μm . Les particules fines ($< 80 \mu\text{m}$) sont de 37% et celles inférieures à 5 mm sont de 88%. La courbe granulométrique qui est représentée sur la Figure 4.10 prend en compte les grains de diamètre $< 5\text{mm}$.



Figure 4.9 : Till d'Eastman

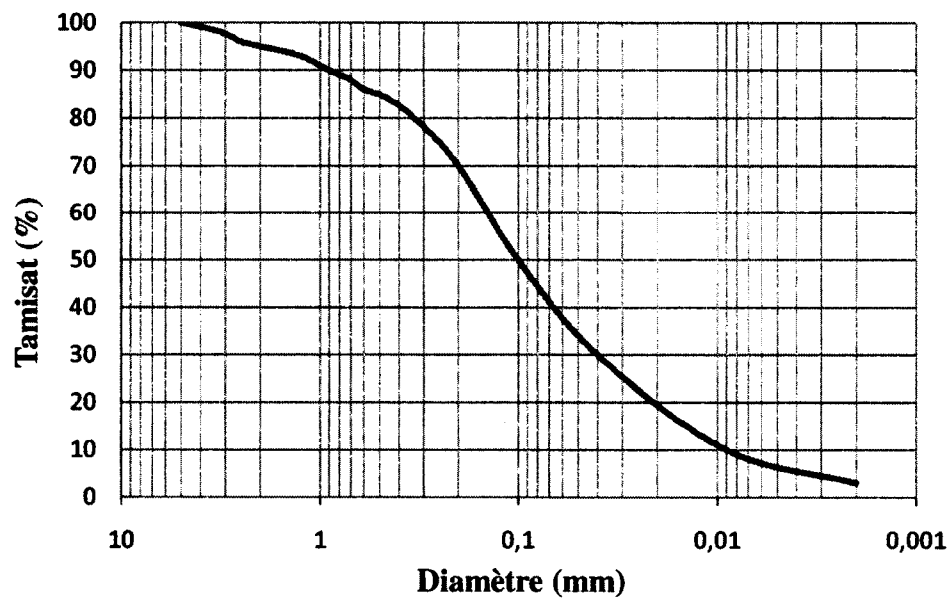


Figure 4.10 : Courbe granulométrique du Till d'Eastman

4.3.5 Récapitulatif des matériaux utilisés

La figure 4.11 et le tableau 4.3 donnent le récapitulatif des éléments caractéristiques des sols granulaires utilisés pour cette recherche.

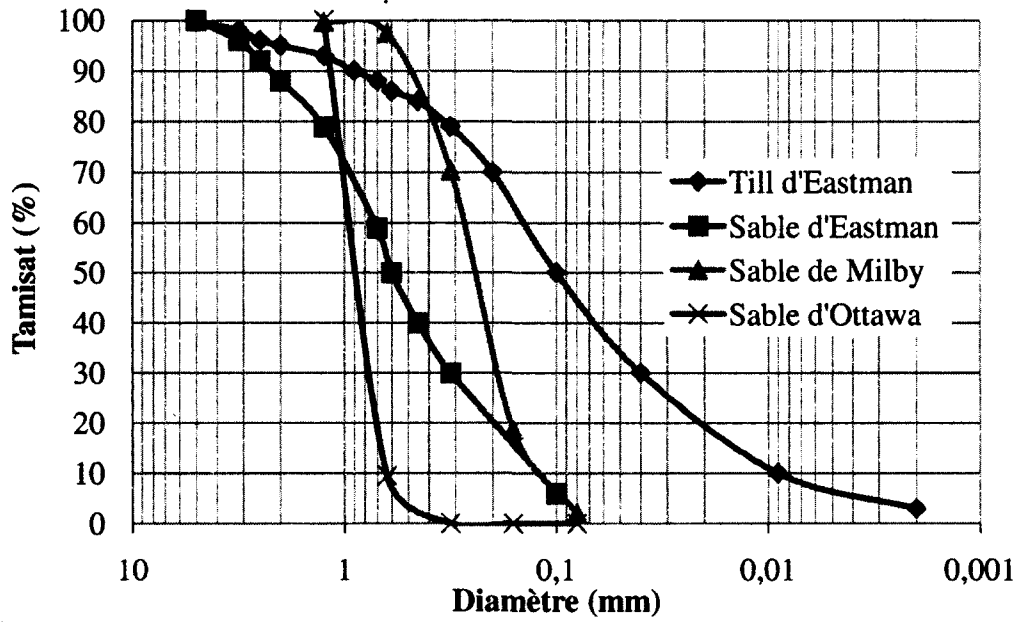


Figure 4.11 : Courbes granulométriques superposées

Tableau 4.3 : Tableau récapitulatif des valeurs caractéristiques des sols utilisés

Sols Granulaires	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	C _u	C _c
Sable d'Ottawa	0,075	0,085	0,075	0,075		
Sable de Milby	0,247	0,283	0,173	0,088	3,2	1,2
Sable d'Eastman	0,075	0,085	0,075	0,075		
Till d'Eastman	0,1	0,124	0,042	0,007	22	2,5

CHAPITRE 5 : PRÉSENTATION, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

5.1 Introduction

Les résultats obtenus et les analyses des essais réalisés à la fois avec les anneaux piézoélectriques (Ring-Actuator) et les cellules œdométriques sont présentés dans cette section. Pour chaque type de sol granulaire étudié (sable d'Ottawa, sable de Milby, sable d'Eastman et le Till d'Eastman), il a été fait différentes analyses :

➤ Pour l'essai œdométrique :

- des courbes de contrainte /déformation.
- des courbes donnant le module œdométrique en fonction de la contrainte verticale.

➤ Pour l'essai ring actuator :

Il a fallu interpréter les différents signaux émis pour la détermination de la vitesse des ondes de cisaillement dans les différents sols. À cet effet, il a été effectué des corrections de signaux à partir du logiciel FLAC 2D énoncé dans le chapitre 3. La Figure 5. 1 illustre un modèle de correction fait sur le sable d'Ottawa pour une fréquence donnée. Les corrections faites sont principalement des corrections de dispersion et celles faites sur les anneaux piézoélectriques. Différentes courbe ont été faites par la suite. Il s'agit de:

- La variation de la vitesse d'ondes de cisaillement (V_s) en fonction de la contrainte verticale et la vitesse normalisée en fonction de l'indice des vides du sol ont été présentées. La vitesse normalisée est donnée par l'équation.

$$V_{s1} = V_s \cdot \left(\frac{100}{\sigma'} \right)^{0.25} \quad (5.1)$$

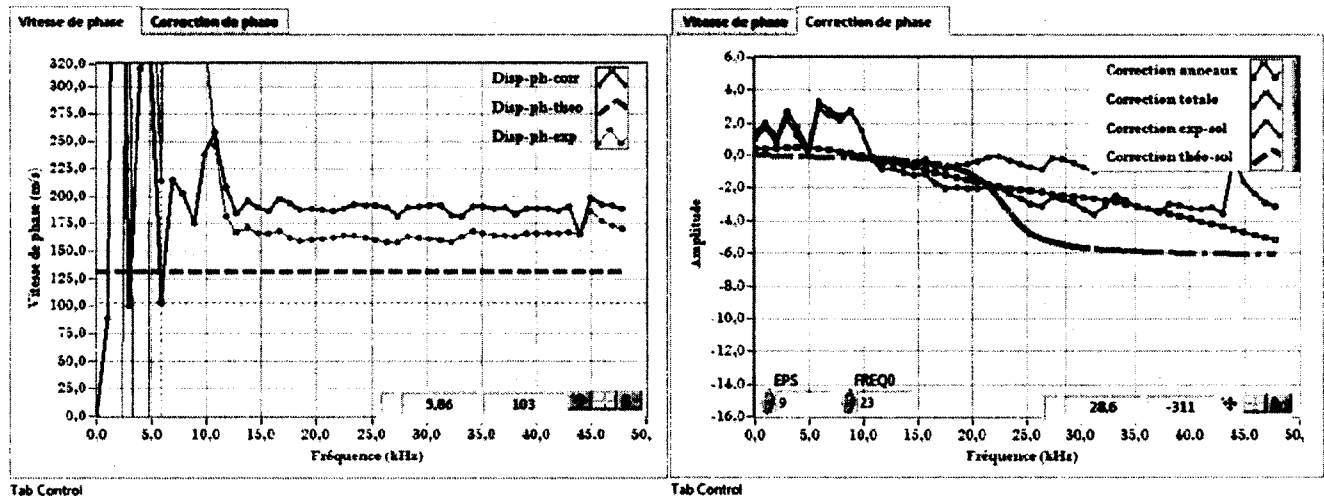
V_s vitesse d'onde cisaillement

V_{s1} vitesse normalisée

σ' contrainte effective

- Des corrélations entre les résultats obtenus via les essais oedométriques et ceux donnés par les anneaux ont été établis.

Afin d'évaluer la variation de la vitesse en fonction du diamètre moyen des grains (D_{50}), il a été étudié la variation de la vitesse normalisée ($\sigma = 100$ kPa) en fonction du D_{50} .



a)

b)

Figure 5. 1 : Illustration d'un modèle de correction a) correction par rapport à la dispersion;
b) correction des anneaux

5.2 Présentation et analyses des résultats

5.2.1. Sable d'Ottawa

a) Sable d'Ottawa lâche

Essai œdométrique

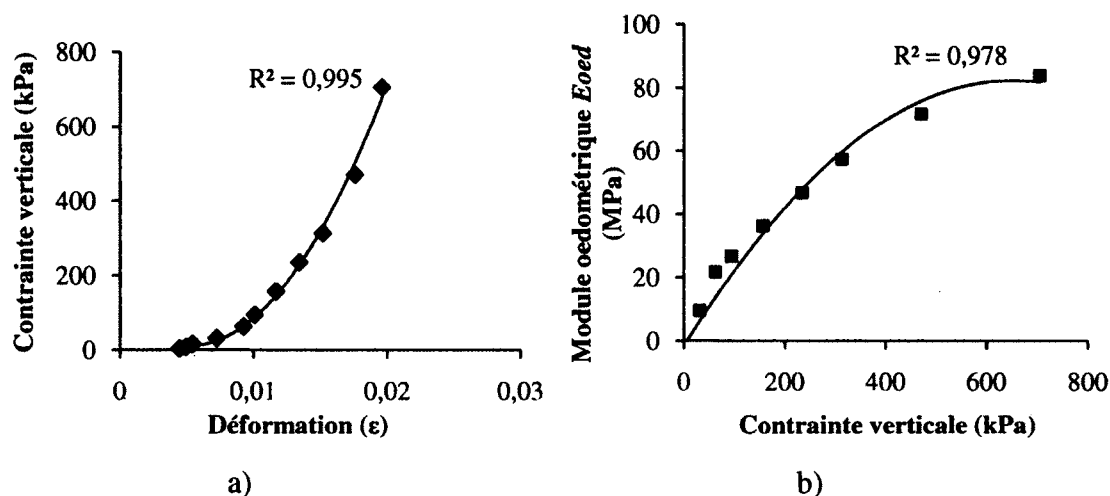
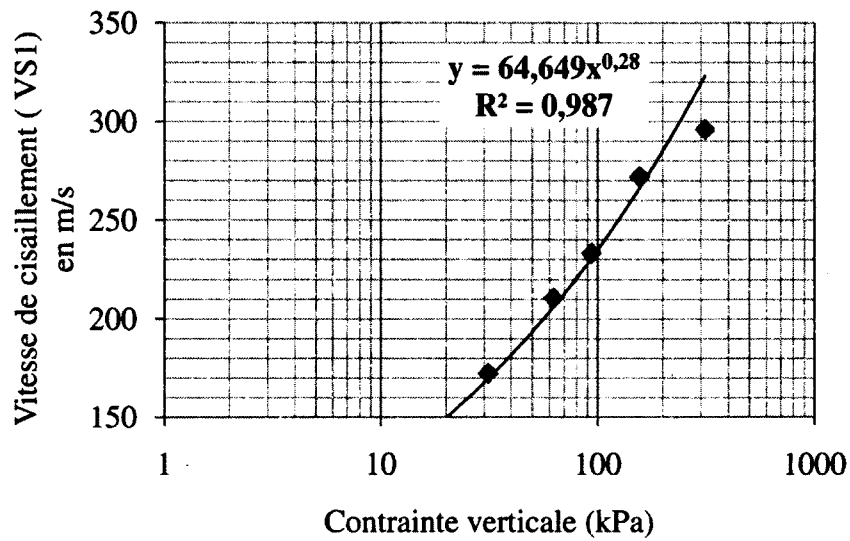


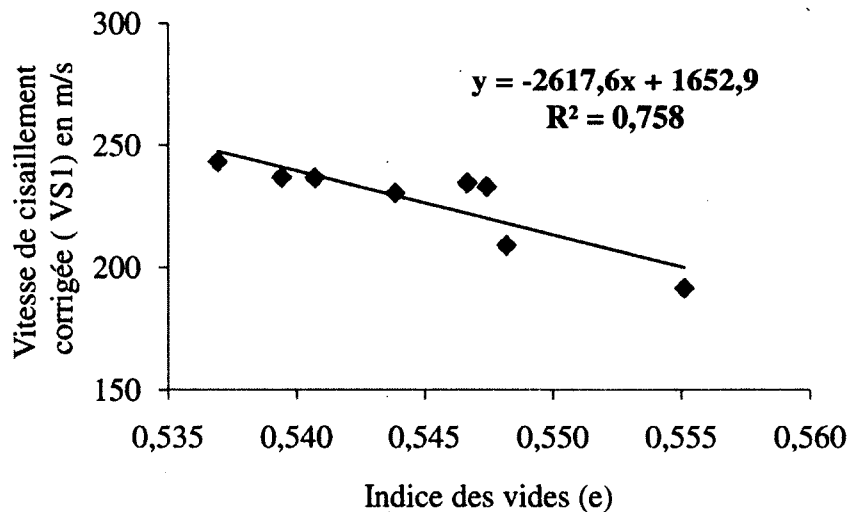
Figure 5. 2 : Courbes œdométriques pour le sable Ottawa lâche; a) $\sigma = f(\epsilon)$ et b) $E_{oed} = f(\sigma)$

Les Figure 5. 2 a) et 5.2 b) présentent respectivement la variation de la contrainte verticale en fonction de la déformation du sol et la variation du module œdométrique (obtenu en dérivant la $(\Delta\epsilon/\sigma)$) en fonction de la contrainte verticale. L'échantillon du sable d'Ottawa lâche révèle des déformations de l'ordre de 0,5 à 2% sous l'effet des contraintes appliquées. La tendance de la courbe contrainte déformation obtenue décrit en partie une parabole. Le module œdométrique quant à lui varie graduellement en fonction de la charge appliquée. Les valeurs maximales du module œdométrique se situent entre 80 et 100 MPa.

Essais avec les anneaux piézoélectriques



a)



b)

Figure 5. 3 : Vitesses de cisaillement pour le sable Ottawa; a) $V_s = f(\sigma)$ et b) $V_{s1} = f(e)$

La variation de la vitesse de cisaillement (V_s) et de la vitesse de cisaillement corrigée (V_{s1}) (obtenue à partir de l'équation 5.1) respectivement en fonction de la contrainte verticale et de l'indice des vides sont présentées sur la Figure 5. 3. La vitesse d'onde de cisaillement augmente (environ 15%) avec l'augmentation de la contrainte verticale (figure 5.3 a)). On peut voir par exemple que pour des contraintes de 30 kPa et 100 kPa, les V_s sont respectivement de 170 et 240 m/s. Cette augmentation décrit une parabole donc l'équation est donnée sur le graphe. La figure

5.3 b) révèle que lorsqu'elle est corrigée (V_{s1}), la vitesse diminue (environ 5%) avec l'augmentation de l'indice des vides. La diminution est marquée par une droite de la forme $ax+b$ comme le montre la figure 5.3 b). Cette dernière laisse entrevoir que, V_s a une valeur maximum inférieure à 300 m/s pour des contraintes inférieures à 470 kPa. Lorsqu'on la corrige, cette valeur maximum (V_{s1}) passe de 300 à 250 m/s soit une différence 50 m/s.

Corrélations entre le module de cisaillement G_{max} et le module oedométrique E_{oed}

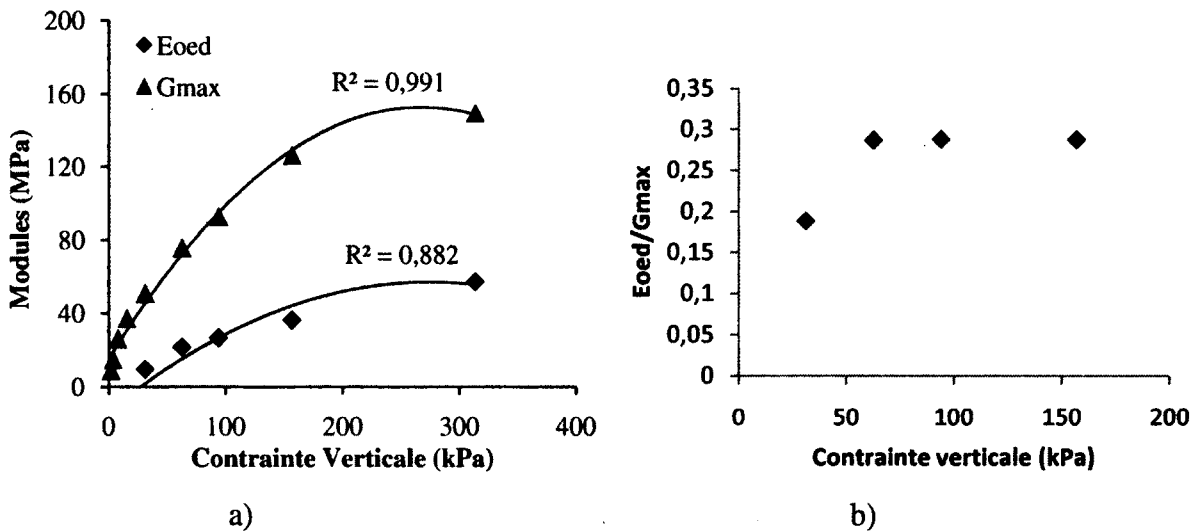


Figure 5. 4 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement.

a) Évolution des modules en fonction de la contrainte; b) $G_{max}/E_{oed} = f(\sigma)$.

Afin d'établir et d'évaluer les corrélations entre le module oedométrique obtenu expérimentalement (essai oedométrique) et le module de cisaillement obtenu à partir des essais ring actuator, il a été présenté sur une même figure (Figure 5. 4 a)) la variation du module oedométrique (E_{oed}) et du module de cisaillement (G_{max}) en fonction de la contrainte verticale. Il est remarqué que $G_{max} > E_{oed}$. Afin d'évaluer l'ordre de grandeur de cette variation, il a été tracé à la Figure 5. 4 b), la courbe $E_{oed}/G_{max} = f(\sigma)$. Il ressort de cette dernière que pour des contraintes < 100 kPa, on a une variation parabolique tandis que pour celles supérieures à, le rapport devient E_{oed}/G_{max} constant soit environ 0,3.

b) Sable Ottawa lâche 2

Essai œdométrique

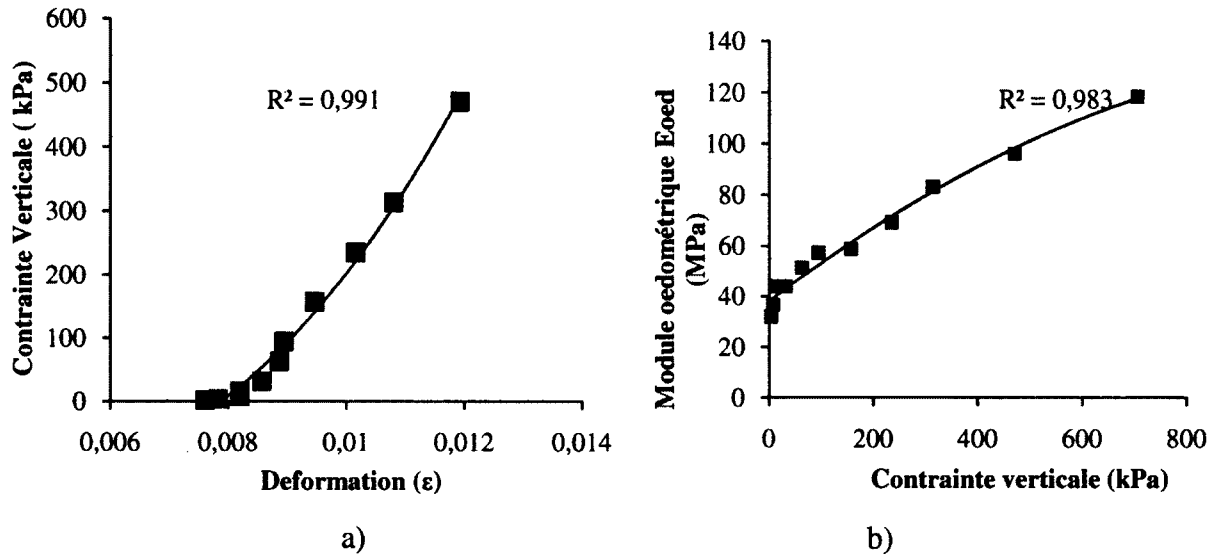
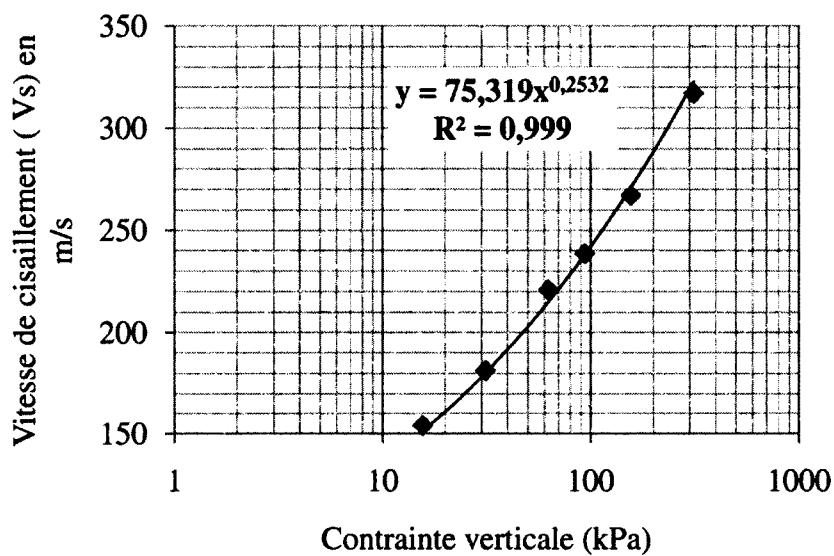


Figure 5. 5 : Courbes œdométriques pour le sable d'Ottawa lâche 2;

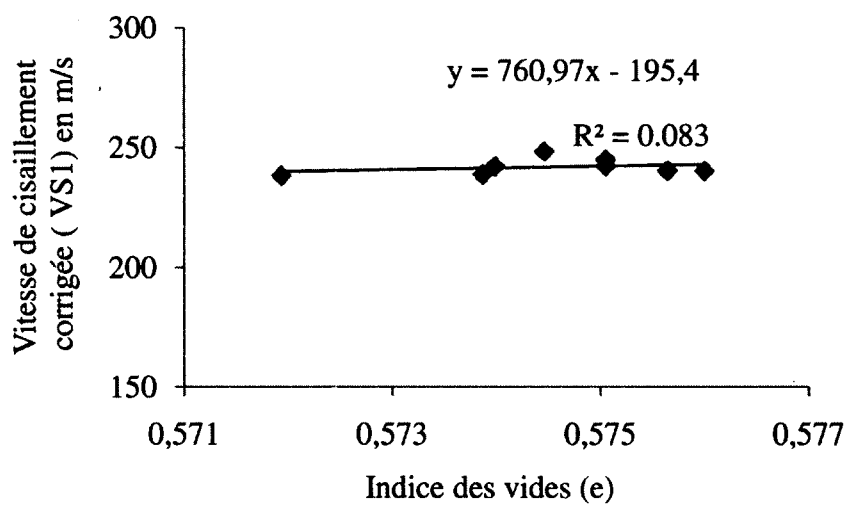
a) $\sigma = f(\epsilon)$ et b) $E_{oed} = f(\sigma)$

Le sable Ottawa 2 présente des déformations de l'ordre de 0,8 à 1,4% (Figure 5. 5 a). Tout comme le sable d'Ottawa lâche, le module œdométrique varie graduellement avec la contrainte. Ces valeurs maximums se situent entre 100 et 120 MPa.

Essais avec les anneaux piézoélectriques



a)



b)

Figure 5. 6 : Vitesses de cisaillement pour le sable d'Ottawa lâche 2;

a) $V_s = f(\sigma)$ et b) $V_{s1} = f(e)$

La vitesse des ondes de cisaillement (V_s) augmente avec l'accroissement de la contrainte verticale. V_{s1} quant à elle diminue très peu avec l'augmentation de l'indice des vides (Figure 5. 6). Ceci peut se justifier par l'état de densification du sol. Ce sol semble plus dense que le sable d'Ottawa 1 malgré qu'il soit lâche. Les valeurs de V_s sont à prendre avec précaution à cause de la tendre rectiligne et constante que la figure 5.6 b) montre. Néanmoins, la valeur maximale de V_{s1} reste inférieure à 250 m/s comme pour le sable d'Ottawa lâche.

Corrélations entre le module de cisaillement G_{max} et le module oedométrique E_{oed}

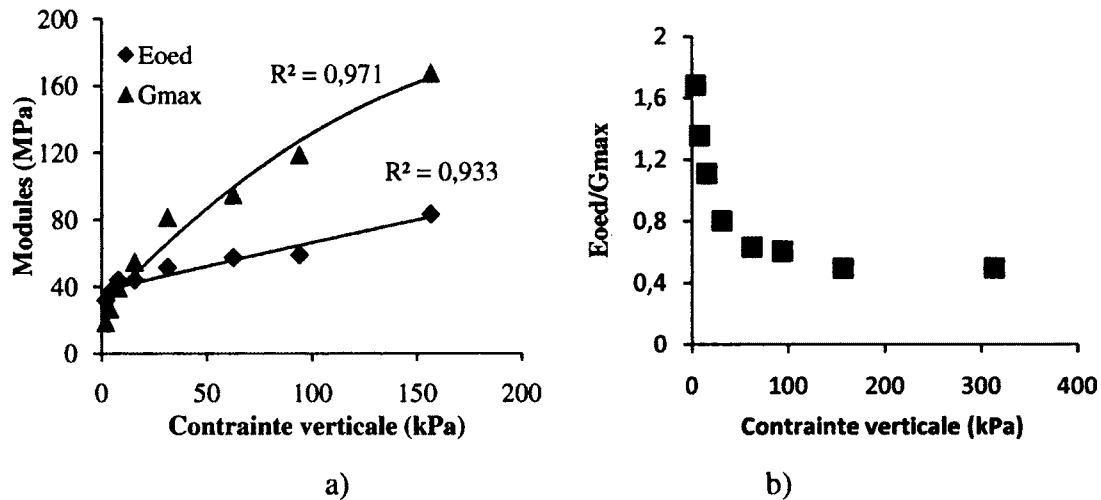


Figure 5. 7 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement pour le sable Ottawa lâche 2. a) Évolution des modules en fonction de la contrainte; b) $G_{max}/E_{oed} = f(\sigma)$

La Figure 5. 8 a) montre que, $E_{oed} < G_{max}$. Tout comme pour le sable d'Ottawa lâche, pour des contraintes > 100 kPa le rapport E_{oed}/G_{max} devient constant soit environ 0,4 (Figure 5. 7). En effet, pour des valeurs de contraintes < 100 kPa Il existe une relation linéaire entre le module de cisaillement et le module oedométrique.

c) *Sable d'Ottawa dense*

Essai œdométrique

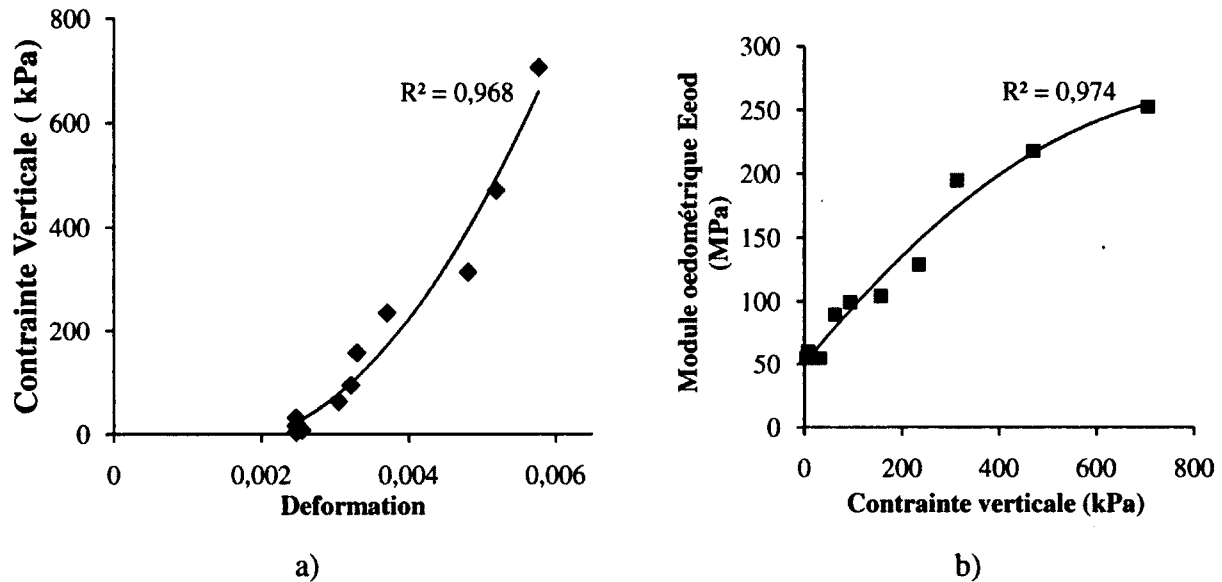
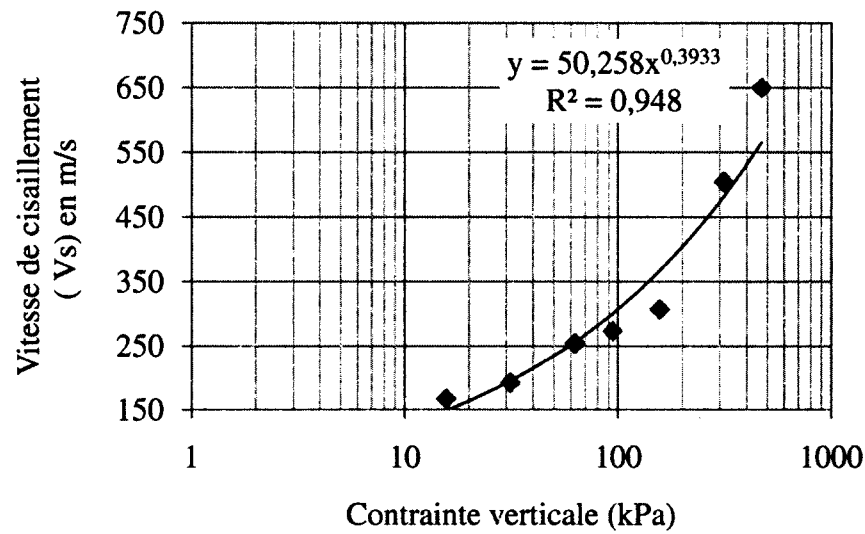


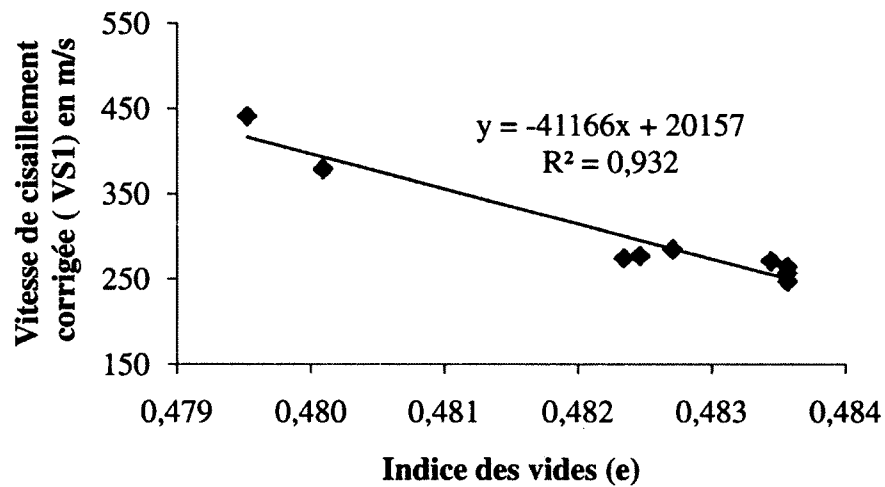
Figure 5. 9 : Courbes œdométriques pour le sable d'Ottawa dense; a) $\sigma = f(\epsilon)$ et b) $E_{oed} = f(\sigma)$

Après la densification du sable d'Ottawa, il ressort qu'il se déforme très peu (de 0,2 à 0,6%) par rapport au sable d'Ottawa lâche 1 et 2. Le module œdométrique est environ deux fois (entre 200 et 250 MPa) plus grand que le module œdométrique des sables d'Ottawa lâches précédemment étudiés (100 et 120 MPa) (Figure 5. 9).

Essais avec les anneaux piézoélectriques



a)



b)

Figure 5. 10 : Vitesses de cisaillement pour le sable d'Ottawa dense; a) $V_s = f(\sigma)$ et b) $V_{s1} = f(e)$

Les vitesses obtenues pour les sables d'Ottawa 1 et 2 étaient de l'ordre de 300 m/s. Maintenant, cet échantillon de sable dense a des vitesses encore plus élevées (deux (2) fois plus grandes) soit 650 m/s. (Figure 5. 10). Cette augmentation peut s'expliquer par le compactage qui a été effectué sur le sable afin de le densifier. La vitesse corrigée quant à elle varie linéairement par rapport à l'indice des vides. Plus cet indice diminue, plus V_{s1} augmente. Elle passe de 450 à 250 m/s.

Corrélations entre le module de cisaillement G_{max} et le module oedométrique E_{oed}

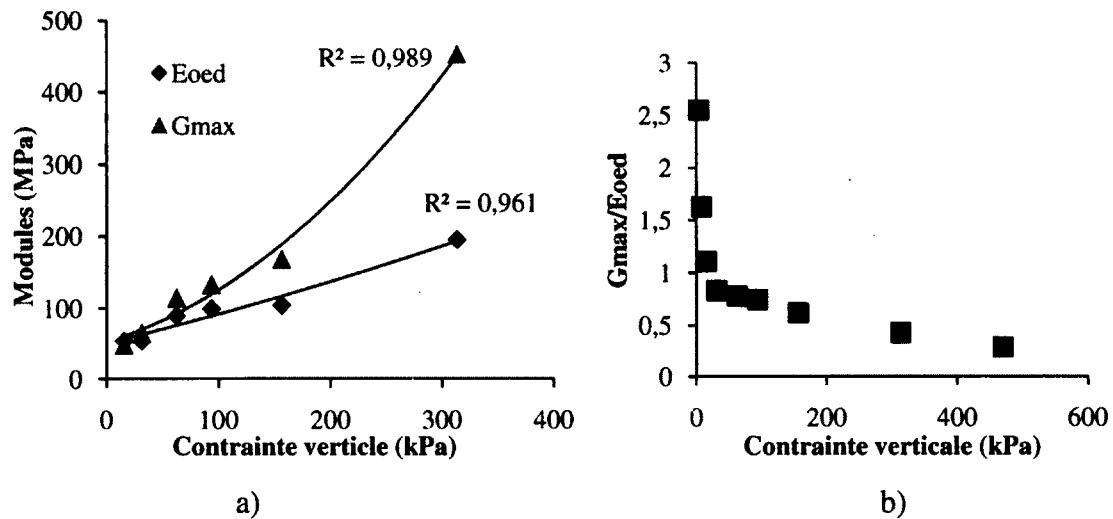


Figure 5. 11 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement pour le sable d'Ottawa dense. a) Évolution des modules en fonction de la contrainte pour le sable d'Ottawa dense; b) $G_{max}/E_{oed} = f(\sigma)$

G_{max} est toujours supérieure à E_{oed} et la variation du rapport G_{max}/E_{oed} est identique à celle des autres sables (1 et 2). Le rapport E_{oed}/G_{max} (pour les contraintes > 100 kPa) dans ce cas de figure est toujours constant. Cette constante se situe entre 0,3 et 0,4. De la Figure 5. 11 on peut conclure que pour une certaine valeur de contrainte, le module de cisaillement est relié au module oedométrique par une fonction linéaire.

d) Conclusions partielles

D'une manière générale, le sable d'Ottawa présente des déformations très faibles ($\epsilon < 2\%$). Le tableau 5.1 donne le récapitulatif de ces valeurs de déformations et de vitesse. De plus, le module oedométrique est pour la plus part des essais toujours inférieur au module de cisaillement. En effet, le rapport entre ces deux modules est compris entre 0,3 et 0,4 pour des valeurs de contraintes < 100 kPa. Ceci laisse penser qu'il existe une relation de linéarité entre ces modules.

Tableau 5. 1 : Récapitulatifs des résultats de vitesses et de modules sur le sable d'Ottawa

Sable	État du sable	e_i	e_f	Id(%)	ϵ_{max}	Vs max m/s	V _{s1} max m/s	E_{oed}/G_{max}
Sable d'Ottawa 1	Lâche	0,637	0,567	73	0,012	330	250	0,4
Sable d'Ottawa 2	Lâche	0,588	0,567	73	0,012	330	250	0,4
Sable d'Ottawa 3	dense	0,751	0,730	101	0,009	650	450	0,35

La Figure 5. 12 illustre la variation du module de cisaillement en fonction du module oedométrique. Il est observé à la vue de ce graphe une bonne tendance linéaire entre ces deux modules. On peut aussi voir que ces trois sables donnent des courbes de ($G_{max} = f(E_{oed})$) qui sont presque parallèles les unes aux autres. On peut dire qu'elles ont presque la même pente. La pente de ces différentes droites peut se traduire par le rapport $\Delta G_{max} / \Delta E_{oed}$. Ce pendant, lors de nos investigations, il a été déterminé le rapport E_{oed}/G_{max} . Il est donc possible dans le souci de déterminer la pente de ces droites de corréler ces deux relations.

Il ressort de cette figure deux points majeurs :

- L'indice de densité augmente en fonction l'augmentation de, la vitesse, du E_{oed} et du G_{max} .
- L'équation de ces droites qui lie E_{oed} et G_{max} peu s'exprimer sous la forme $ax + b$

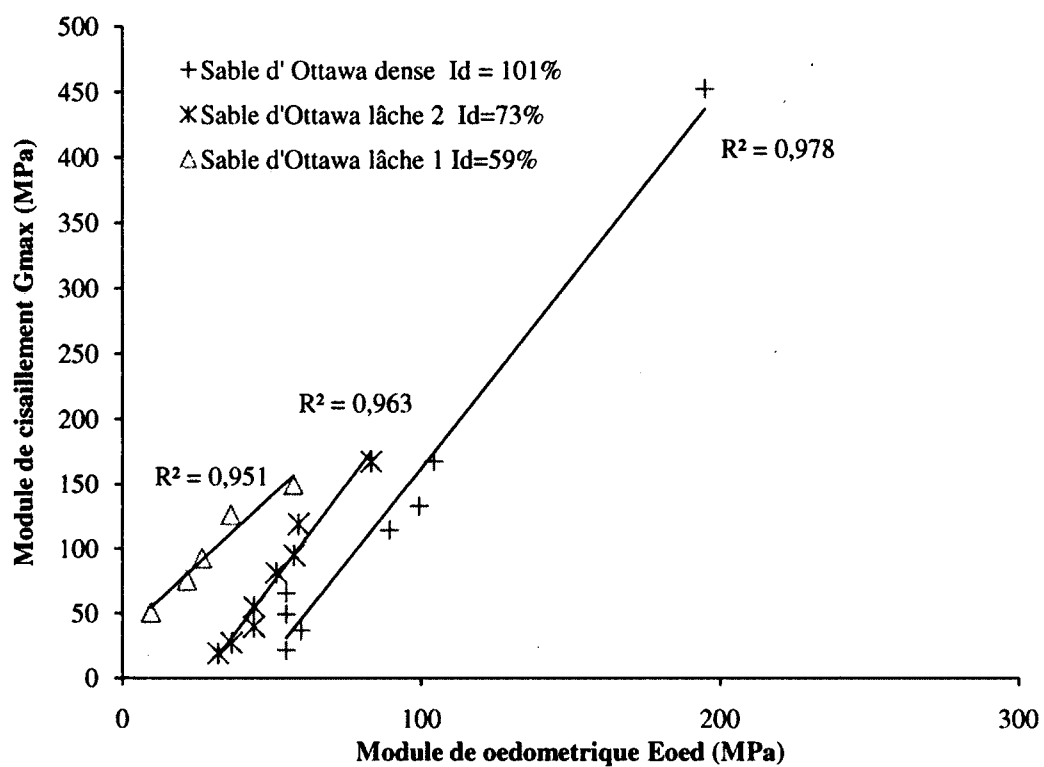


Figure 5. 12 : Courbe donnant le module cisaillement et le module de oedométrie

5.2.2. Sable de Milby

a) Sable de Milby dense

Essai œdométrique

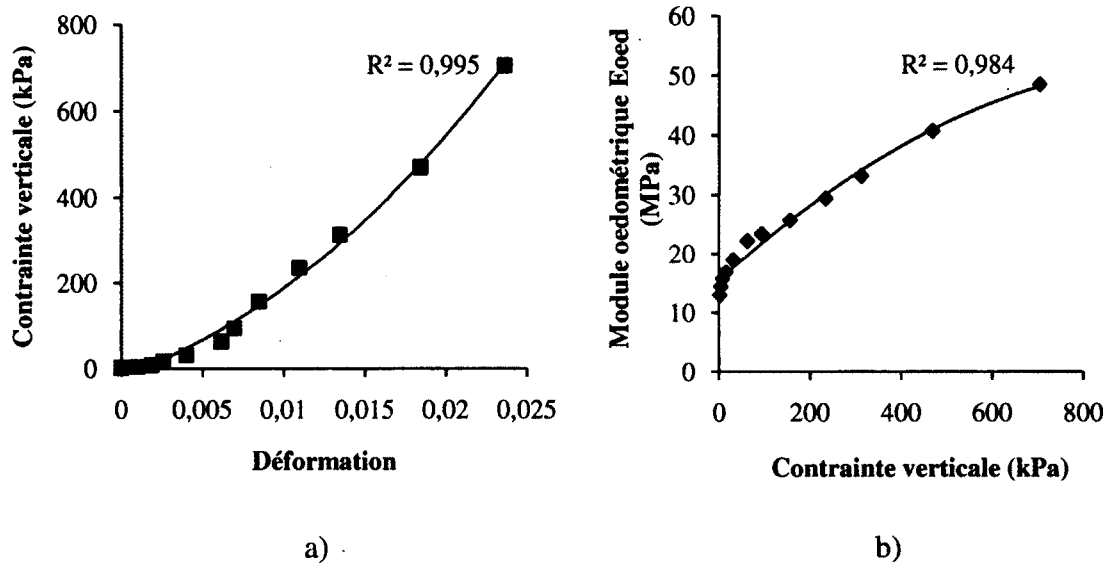
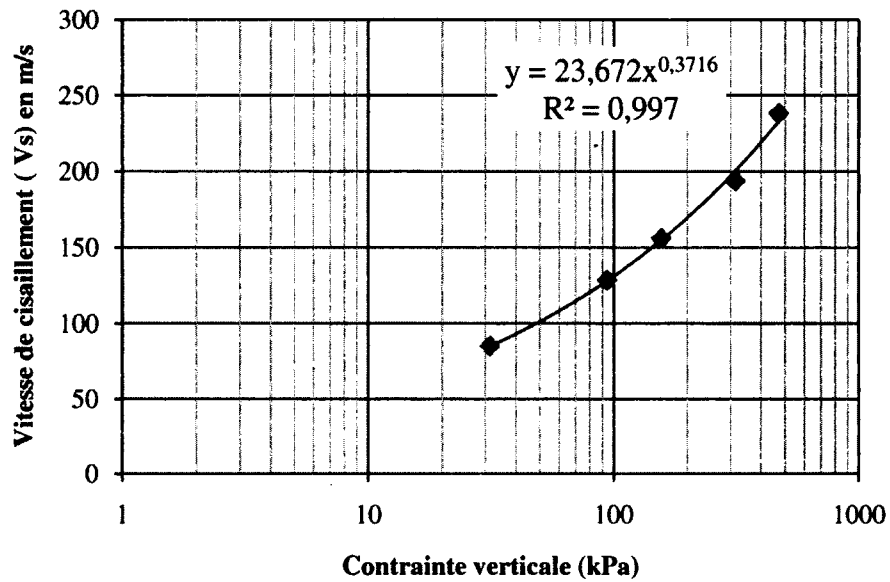


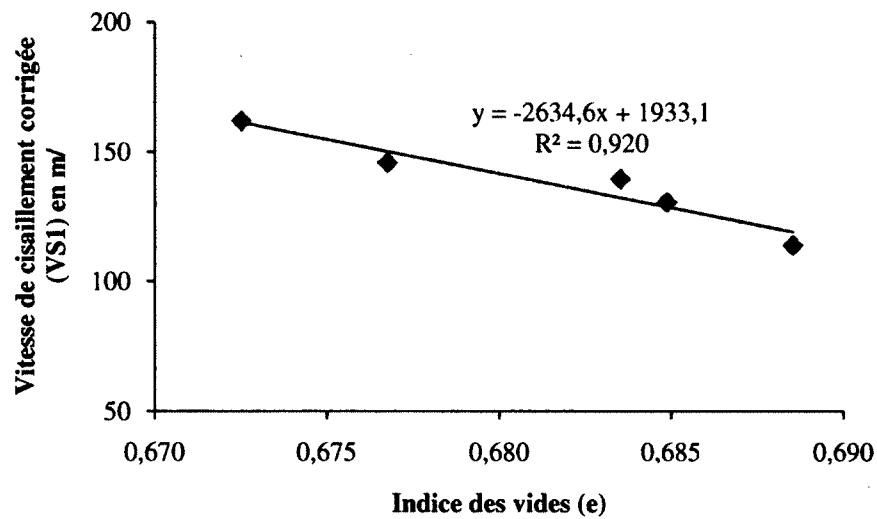
Figure 5. 13 : Courbes œdométriques pour le sable de Milby dense 1 ; a) $\sigma = f(\epsilon)$ et b) $E_{oed} = f(\sigma)$

La déformation de ce sable est semblable à celle du sable d'Ottawa lâche 1. En effet, ce sable de Milby présente des déformations variant de 0 à 2,5%. Son module œdométrique est de l'ordre de 40 à 60 MPa (Figure 5. 13) contrairement au sable d'Ottawa qui a un module œdométrique de l'ordre de 200 à 250 MPa. Ce sable a un module qui est environ 5 fois plus petit que pour celui des sables d'Ottawa lâches. Cette variation peut se justifier par la différence de granulométrie. Pour le sable de Milby de D_{50} est égal à 0,247 mm et pour le sable d'Ottawa, il est de 0,37mm

Essai avec les anneaux piézoélectriques



a)



b)

Figure 5. 14 : Vitesses de cisaillement pour sable de Milby dense 1 ; a) $V_s = f(\sigma)$ et b) $V_{s1} = f(e)$

La vitesse d'onde de cisaillement augmente (elle passe de 60 à 250 m/s environ) avec l'augmentation de la contrainte (de 30 à 500 kPa). La vitesse corrigée V_{s1} diminue quant à elle avec l'augmentation de l'indice des vides. Celle-ci varie linéairement avec l'indice des vides comme observé dans les essais avec les sables d'Ottawa. Les valeurs de vitesses dans ce sable, sont inférieures à celles obtenues avec les sables d'Ottawa. Ceci peut s'expliquer par la variation du diamètre moyen (D_{50}) qui est de l'ordre de 0,247 mm pour les sables de Milby et de l'ordre de 0,37 mm pour les sables d'Ottawa. En effet, les vitesses ici sont respectivement de l'ordre de 250 m/s pour la vitesse de cisaillement et d'environ 170 m/s pour la vitesse corrigée (Figure 5. 14).

Corrélations entre le module de cisaillement G_{max} et le module oedométrique E_{oed}

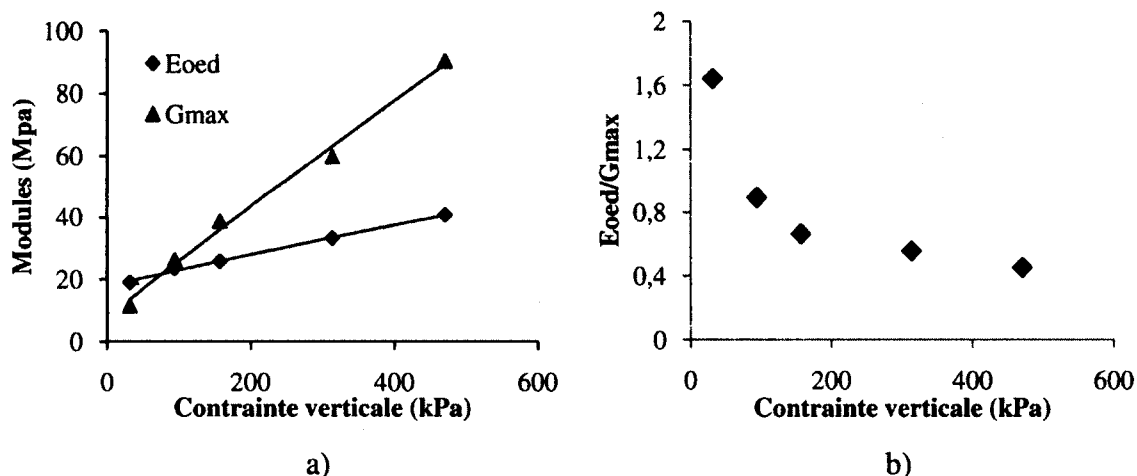


Figure 5. 15 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement.
a) Évolution des modules en fonction de la contrainte pour le sable de Milby dense 1;
b) $G_{max}/E_{oed} = f(\sigma)$

À très faible contrainte verticale (< 100 kPa), les modules de cisaillement et oedométriques sont semblables. Par contre pour des contraintes verticales élevées, le module de cisaillement reste élevé par rapport au module oedométrique (Figure 5. 15). Le rapport des modules suit toujours pour les 100 premiers kPa une courbe parabolique et pour les contraintes supérieures à 100 kPa une droite. Ce rapport varie cette fois de 0,45 à 0,5. La relation de linéarité se confirme.

b) Sable de Milby dense 2

Essai œdométrique

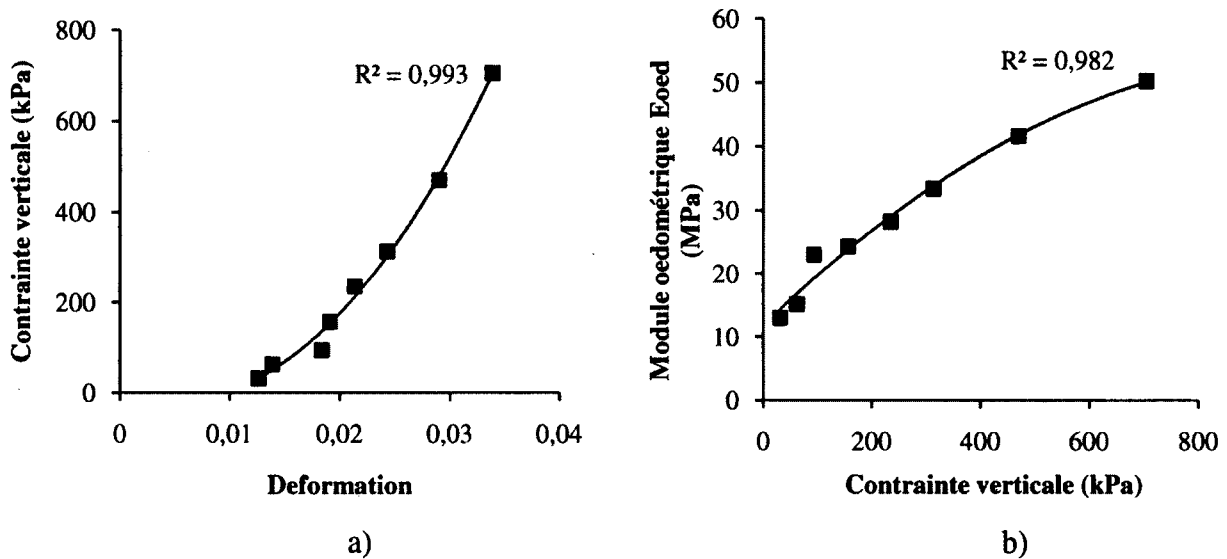
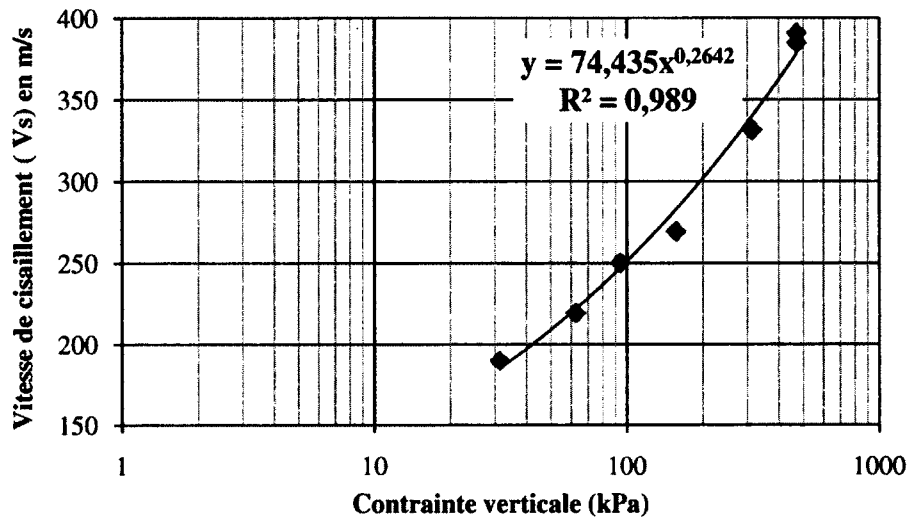


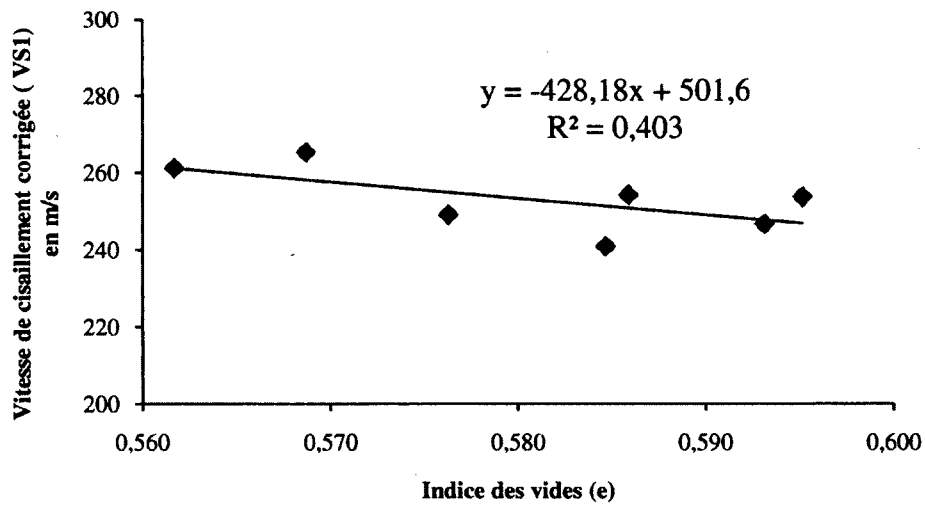
Figure 5. 16 : Courbes œdométriques pour le sable Milby dense 2; a) $\sigma = f(\epsilon)$ et b) $E_{oed} = f(\sigma)$

À la Figure 5. 16, on remarque que la déformation varie de 1,3 à 3,5% contrairement au sable précédent qui varie de 0 à 2,5%. Cette variation peut s'expliquer par le fait que l'échantillon avant sa densification a été porté à une teneur en eau de 5% par rapport à au sable de Milby 1 qui a été pris sec ($w = 0\%$). Cependant malgré cet apport en eau, on constate que le module œdométrique n'a pas varié par rapport au Milby dense 1. L'eau n'a pas eu d'effets significatifs sur le module œdométrique.

Essais avec les anneaux piézoélectriques



a)



b)

Figure 5. 17 : Vitesses de cisaillement pour le sable milby dense 2; a) $V_s = f(\sigma)$ et b) $V_{s1} = f(e)$

Les valeurs de vitesse sont à prendre avec beaucoup de précaution car les tendances des courbes sont différentes de celle observée avec les autres sables. On peut justifier cet écart par une mauvaise manipulation qui aurait pu survenir dans la réalisation de cet essai. Néanmoins, il ressort que pour une contrainte verticale de 470 kPa, les vitesses de cisaillement obtenues pour les sables de Milby dense 1 et 2 sont respectivement environ de 249 et 390 m/s. L'eau a permis une meilleure densification des sols l'augmentation des vitesses de cisaillement. Dans cet essai, V_{s1} varie linéairement avec l'indice des vides (Figure 5. 17).

Corrélations entre le module de cisaillement G_{max} et le module oedométrique E_{oed}

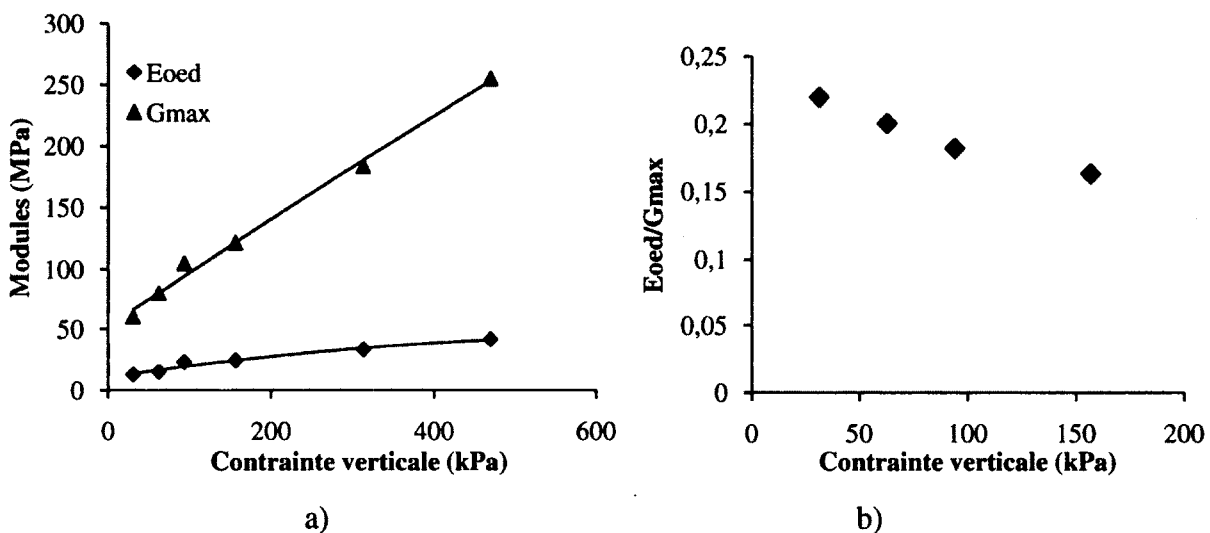


Figure 5. 18 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement.

a) Évolution des modules en fonction de la contrainte pour sable de Milby dense 2;

b) $G_{max}/E_{oed} = f(\sigma)$

Les observations faites pour le sable de Milby dense 2 sont similaires à celles du sable de milby dense 1. À la seule différence que le rapport E_{oed}/G_{max} se situe entre 0,16 et 0,2 pour la partie de la courbe qui est linéaire c'est-à-dire celle qui correspond au contrainte supérieures à 10kpa (Figure 5. 18)

c) Conclusions partielles

Tout comme pour les sables d'Ottawa, les sables de Milby présentent de manière générale des déformations $\epsilon < 3,5\%$. De plus, le module oedométrique est toujours (pour tous les essais effectués) inférieure au module de cisaillement. Le rapport entre ces deux modules est une

constante qui varie pour ce sable entre 0,16 et 0,42. Ce qui amène à dire qu'il existe une relation de linéarité entre ces derniers (tableau 5.2).

Tableau 5.2 : Récapitulatifs des résultats de vitesses et de modules sur le sable de Milby

Sable	État du sable	e_i	e_f	ε_{max}	Vs max m/s	V _{s1} max m/s	E _{eod} /G _{max}
Sable de Milby 1	dense	0,509	0,478	0,034	240	180	0,42
Sable de Milby 2	dense	0,478	0,455	0,026	390	280	0,16

En faisant une comparaison avec le sable d'Ottawa, on peut conclure que, la vitesse des ondes de cisaillement varie avec l'augmentation du D_{50} car, comme on a pu le remarquer pour le sable de Milby dense 1, bien qu'il ait la même déformation que le sable d'Ottawa lâche 1 (0 à 2,5 %), il présente des valeurs de vitesse environ 5 fois plus petite que ce dernier. En comparant le diamètre médian D_{50} du sable d'Ottawa (0,37 mm) à celui du sable de Milby (0,247 mm) on constate que plus il est élevée, plus la vitesse des ondes de cisaillement est grande. On conclusion, c'est la grosseur des particules qui a influé sur les vitesses.

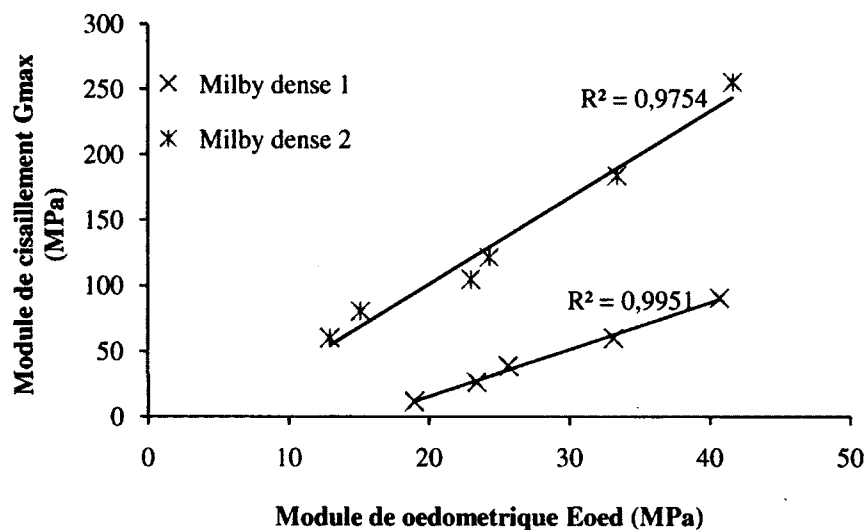


Figure 5.19 : Relation entre le module cisaillement et le module de oedométrie

La Figure 5.19 montre une fois de plus qu'il existe une bonne tendance linéaire entre les deux modules.

5.2.3. Sable d'Eastman

a) Sable d'Eastman dense

Essai oedométrique

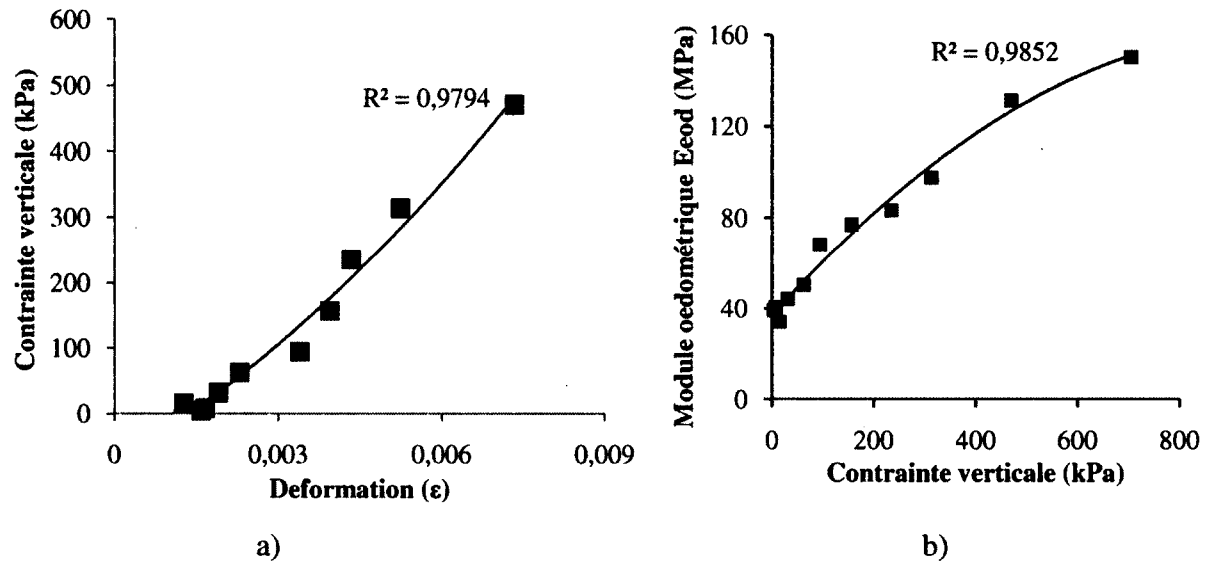
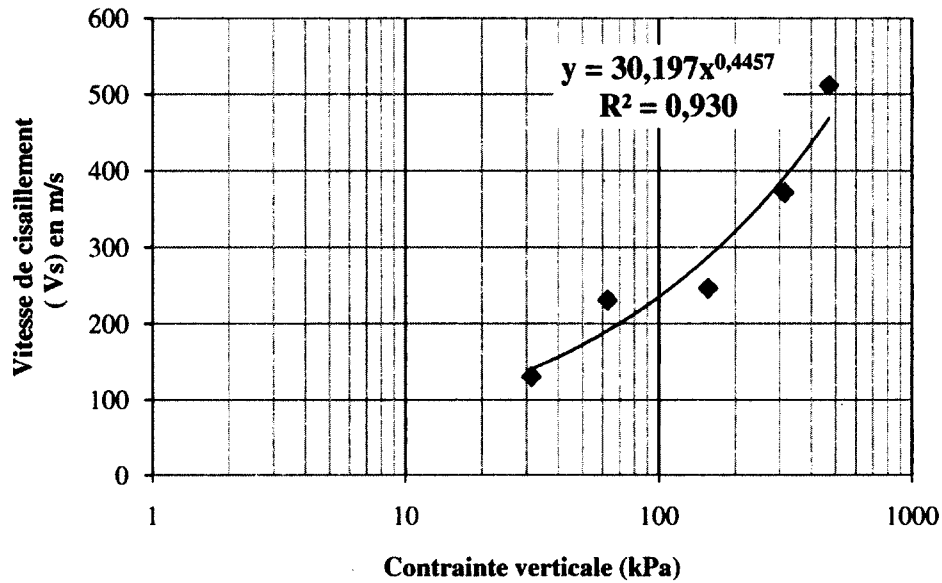


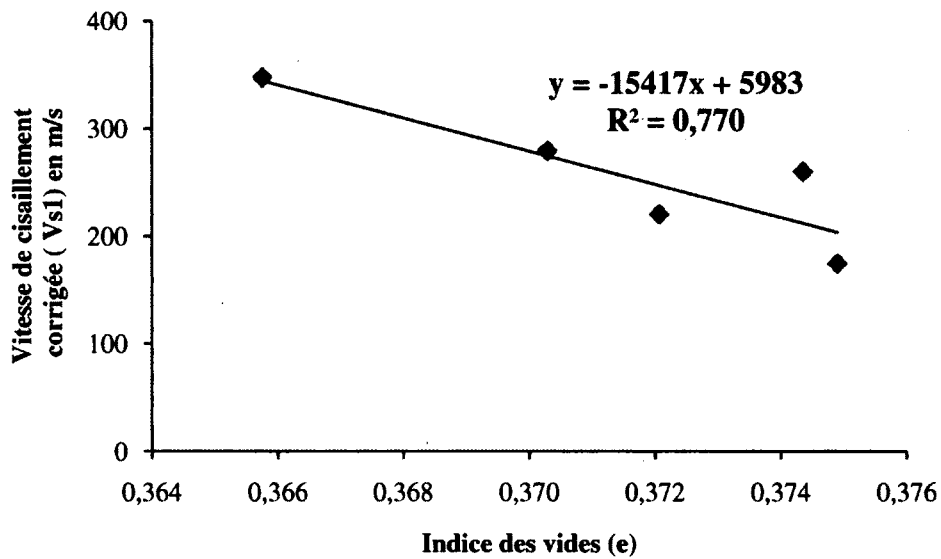
Figure 5. 20 : Courbes oedométriques pour le sable d'Eastman dense; a) $\sigma = f(\epsilon)$ et b) $E_{oed} = f(\sigma)$

Le sable d'Eastman est un sable qui se déforme très peu (0,02 à 0,08%) contrairement aux autres sables. Son module oedométrique maximum se situe entre 140 et 150 MPa. Il est environ deux fois supérieur à celui du sable de Milby (Figure 5. 20).

Essai avec les anneaux piézoélectriques



a)



b)

Figure 5. 21 : Vitesses de cisaillement pour le sable d'Eastman dense ; a) $V_s = f(\sigma)$ et b) $V_{sl} = f(e)$

Les vitesses maximums dans ce sable eastman sont de l'ordre de 500 à 600 m/s (Figure 5. 21). Tous comme les autres sols, elles varient respectivement avec la contrainte et l'indice des vides.

On peut aussi observer que malgré la faiblesse des ces déformations, le sable d'Eastman dense présente des vitesses supérieures à celles des sable d'Ottawa et de Milby. On peut l'expliquer par la variation du d_{50} . Dans ce cas de figure, il est supérieur au deux autres sables,

Corrélations entre le module de cisaillement G_{\max} et le module oedométrique E_{oed}

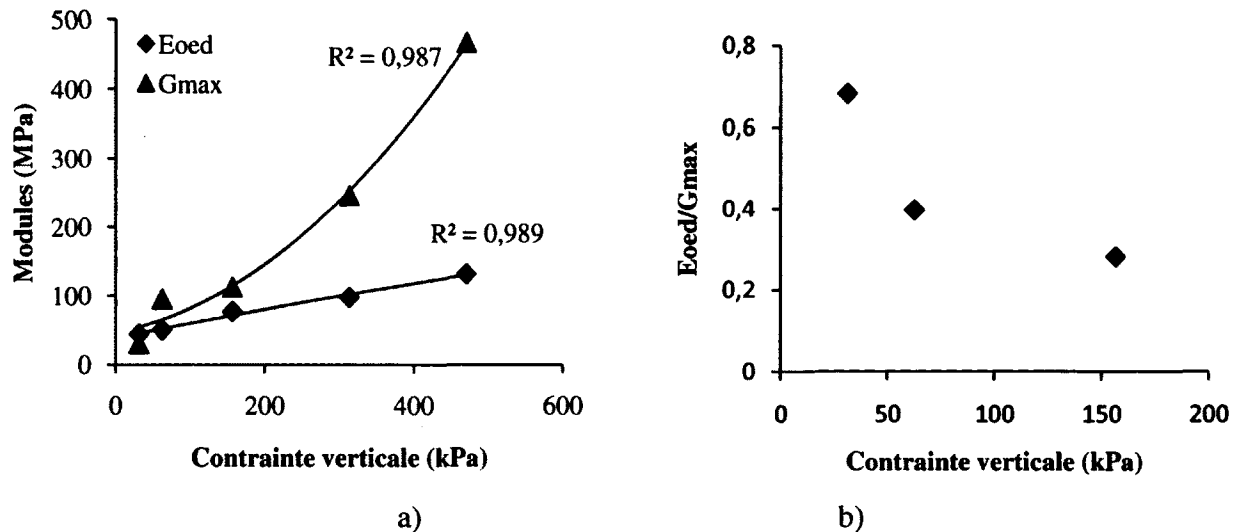


Figure 5. 22 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement. a) Évolution des modules en fonction de la contrainte pour sable d'Eastman dense; b) $G_{\max}/E_{\text{oed}} = f(\sigma)$

G_{\max} est toujours supérieur à E_{oed} et la variation du rapport G_{\max}/E_{oed} est identique à celle des autres sables. Le rapport E_{oed}/G_{\max} dans ce cas de figure est toujours constant. Cette constante se situe entre 0,3 et 0,4. Le module de cisaillement est relié au module oedométrique par une fonction linéaire.

b) Sable d'Eastman lâche

Essai oedométrique

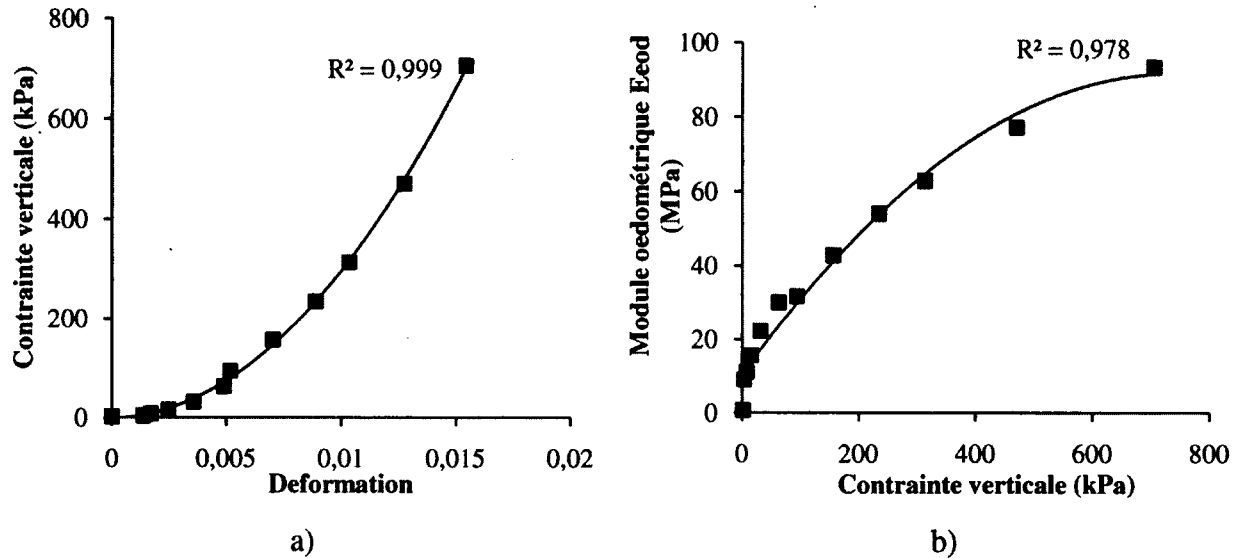
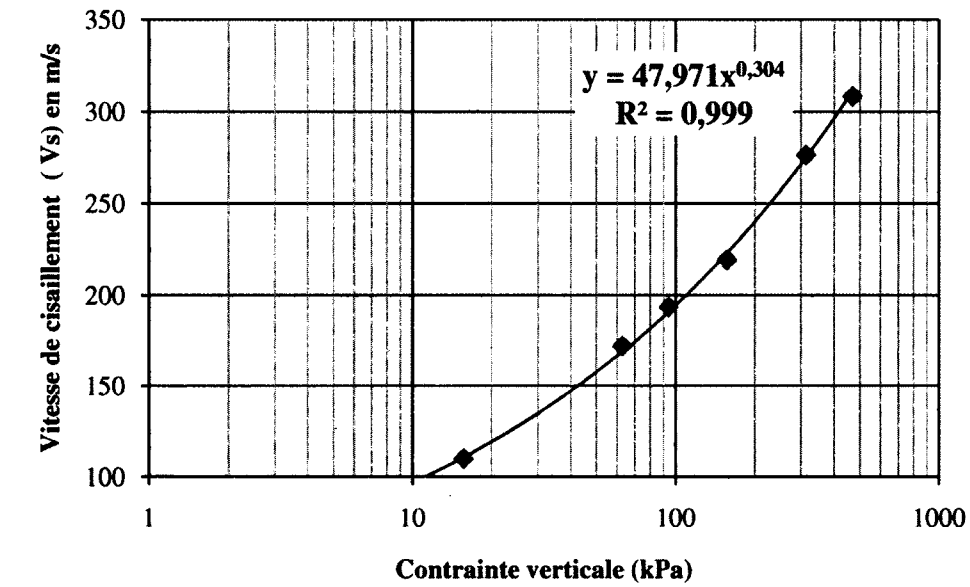


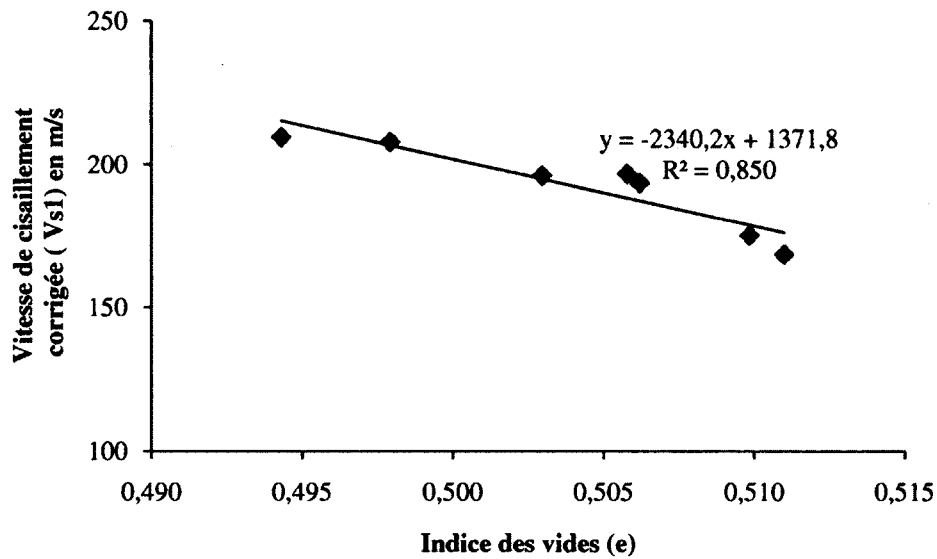
Figure 5. 23 : Courbes oedométriques pour le sable d'Eastman lâche; a) $\sigma = f(\epsilon)$ et b) $E_{oed} = f(\sigma)$

Les déformations sont plus élevées (varie de 0 à 1,5%) que celles du sol précédent car elles sont dans un état lâche. Le module oedométrique varie de 80 à 100 MPa soit 60% de moins que le sable d'Eastman dense. Ceci se justifie avec la densification du sol.

Essais avec les anneaux piézoélectriques



a)



b)

Figure 5. 24 : Vitesse de cisaillement pour le sable d'Eastman lâche; a) $V_s = f(\sigma)$ et b) $V_{s1} = f(e)$

La variation des vitesses reste identique aux autres sols étudiés. Bien étant lâche, ces vitesses sont respectivement supérieures à celles du sable d'Ottawa lâche et de Milby dense. Ces vitesses sont inférieures à 250 m/s.

Corrélations entre le module de cisaillement G_{\max} et le module oedométrique E_{oed}

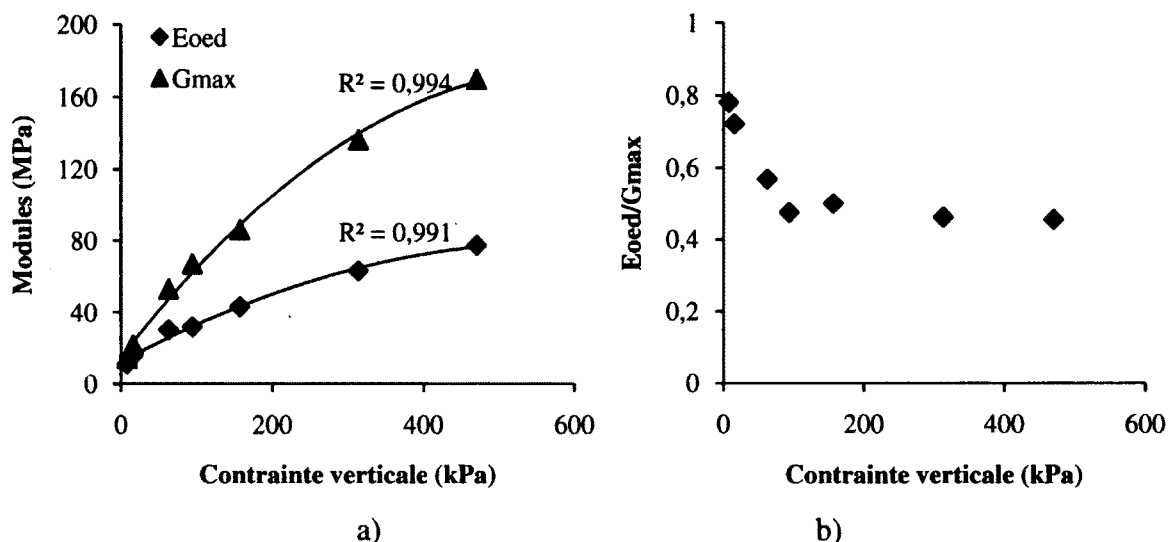


Figure 5. 25 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement. a)

Évolution des modules en fonction de la contrainte pour sable d'Eastman lâche;

b) $G_{\max}/E_{\text{oed}} = f(\sigma)$

Il ressort très clairement dans la Figure 5. 25, que le rapport E_{oed}/G_{\max} reste toujours constant pour les valeurs supérieures à 100 kPa et cette constance varie entre 0,45 et 0,5. La linéarité entre les modules de cisaillement et oedométrique a été encore observée.

c) Conclusions partielles

Le tableau 5.3 récapitule les valeurs de déformation et des vitesses trouvées dans ce sable. En effet, il se dégage de ce cas de figure le même aspect que pour les deux sables précédent. En effet, la vitesse augmente avec l'augmentation de la contrainte, le diamètre médian influe sur V_s , c'est-à-dire V_s augment avec l'augmentation du D_{50} . Le rapport des deux modules est compris entre 0,3 et 0,5 ce qui permet de conclure qu'il existe une relation de linéarité entre ces derniers.

Cette relation peut être matérialisé sous la forme d'équation de droite de la forme $a x + b$. La Figure 5. 26 illustre la corrélation linéaire qui existe entre G_{max} et E_{oed} .

Tableau 5.3 : Récapitulatifs des résultats de vitesses et de modules sur le sable d'Eastman

Sable	État du sable	e_i	e_f	ε_{max}	$V_s \text{ max}$ m/s	$V_{s1} \text{ max}$ m/s	E_{oed}/G_{max}
Sable d'Eastman 1	lâche	0,5148	0,496	0,015	220	210	0,4
Sable d'Eastman 2	dense	0,378	0,370	0,009	510	350	0,3

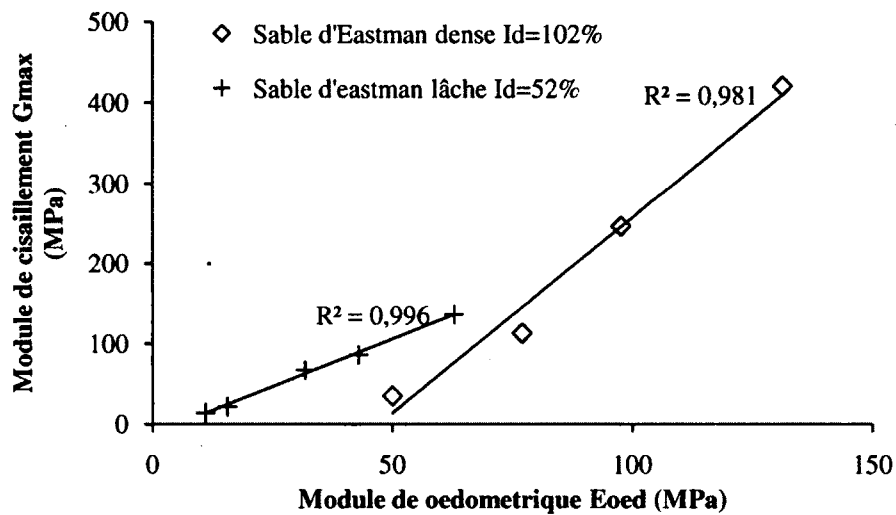


Figure 5. 26 : Relation entre le module cisaillement et le module de oedométrique.

5.2.4. Till Eastman lâche

Essai œdométrique

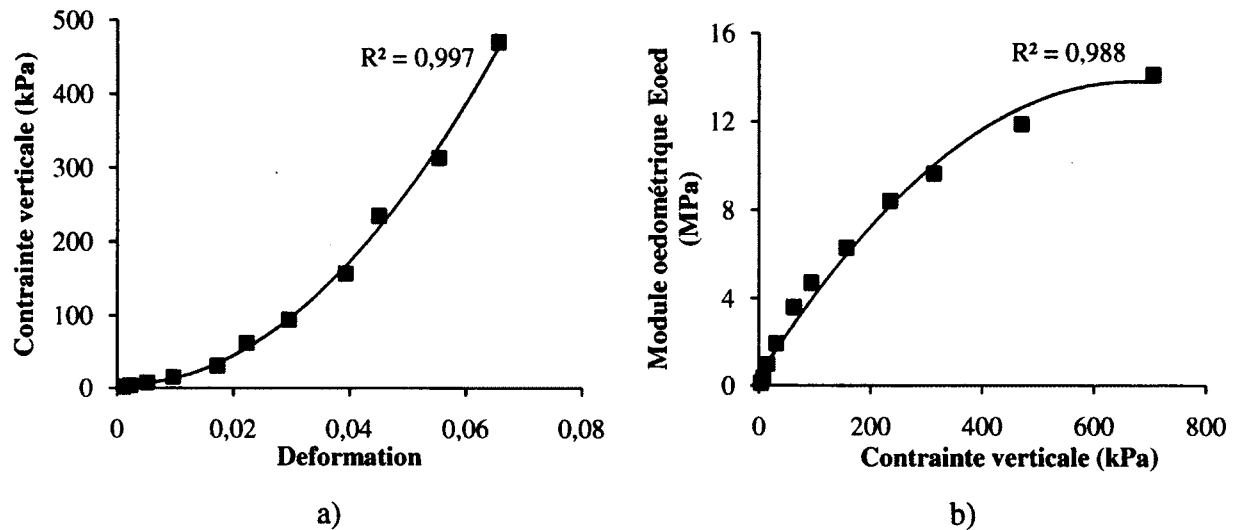
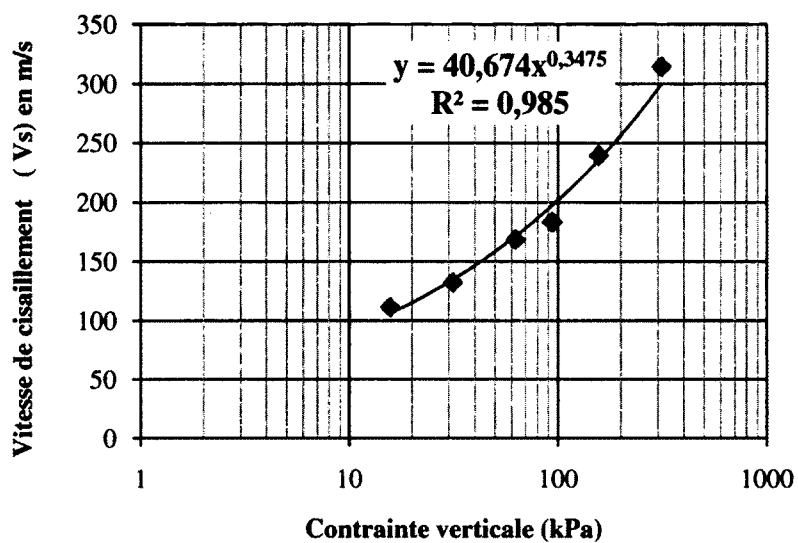


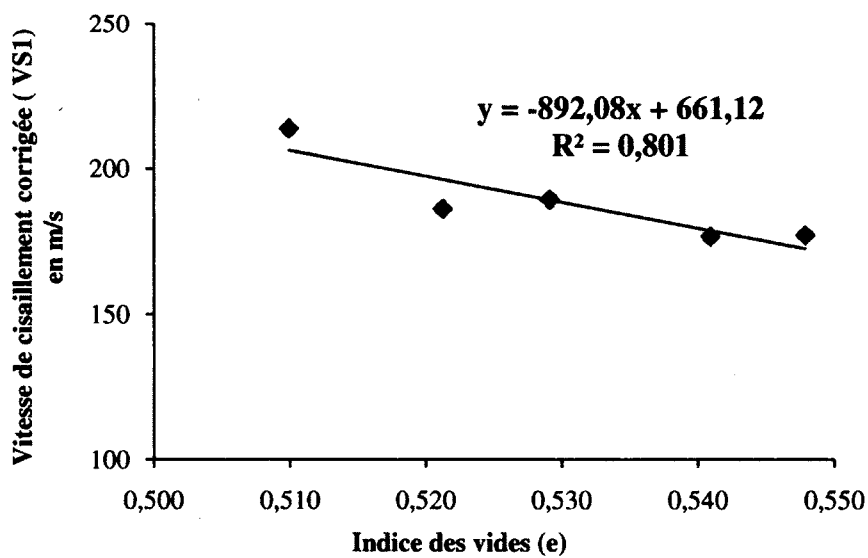
Figure 5. 27 : Courbes œdométriques de Till Eastman lâche; a) $\sigma = f(\epsilon)$ et b) $E_{oed} = f(\sigma)$

Le module œdométrique du till Eastman lâche est nettement inférieur (plus de 10 fois) à ceux des autres sols étudiés. Son maximum se situe entre 12 et 16 MPa. Malgré cette différence, il présente le même comportement que les autres sols. Sa déformation est de l'ordre de 0 à 7%.

Essai avec les anneaux piézoélectriques



a)



b)

Figure 5. 28 : Vitesses de cisaillement pour sable de Till Eastman lâche; a) $V_s = f(\sigma)$
et b) $V_{s1} = f(e)$

La vitesse de cisaillement augmente lorsque la contrainte verticale appliquée augmente (idem dans les autres sols). Le till d'Eastman dans sa composition granulométrique présente un d_{50} de 0,1 mm donc 2 voir 6 fois moins que les autres sols. C'est ce qui pourrait justifier que sa vitesse soit inférieure à celles des sables étudiés précédemment.

Corrélations entre le module de cisaillement G_{\max} et le module oedométrique E_{oed}

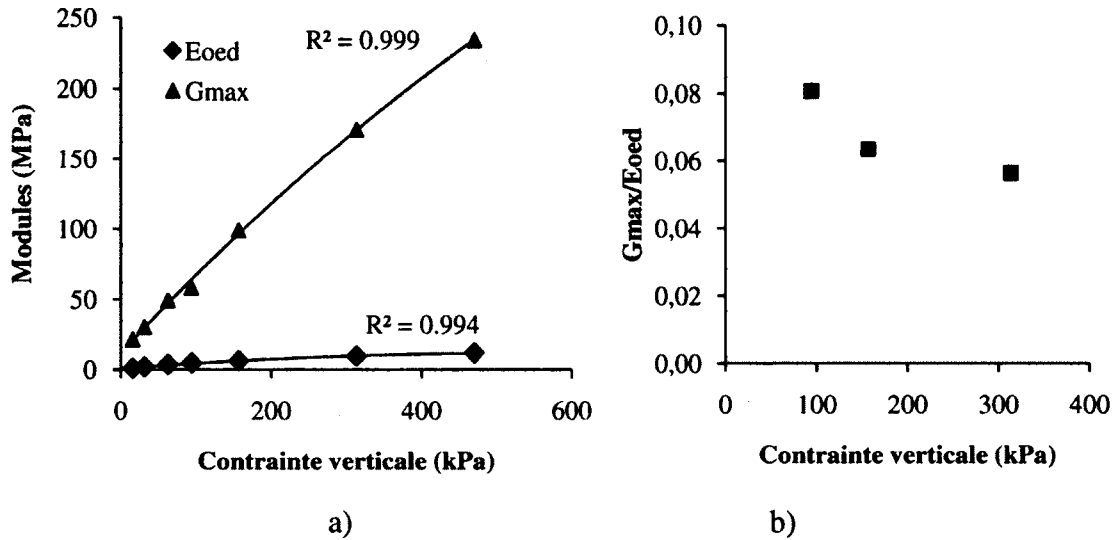


Figure 5. 29 : Corrélations entre le module oedométrique et le module de cisaillement. a) Évolution des modules en fonction de la contrainte pour sable de Till Eastman lâche; b) $G_{\max}/E_{\text{oed}} = f(\sigma)$

G_{\max} est toujours supérieur à E_{oed} et la variation du rapport G_{\max}/E_{oed} est identique à celle des autres sables. Le rapport E_{oed}/G_{\max} dans ce cas de figure est toujours constant. Cette constante se situe entre 0,05 et 0,06. Le module de cisaillement est relié au module oedométrique par une fonction linéaire (Figure 5. 30).

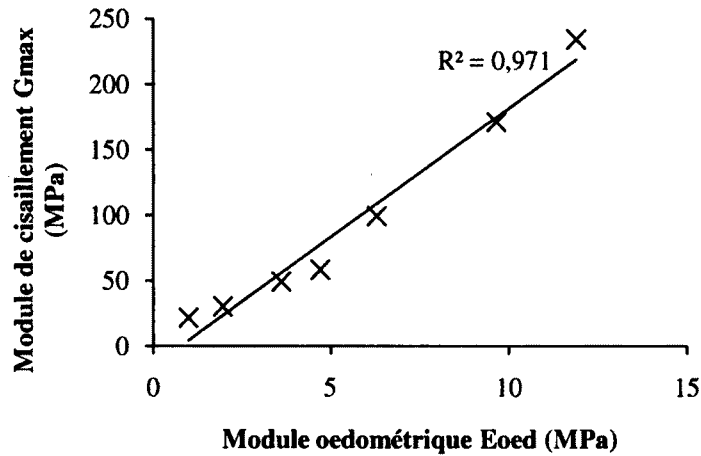


Figure 5. 30 : Relation entre le module cisaillement et le module de oedométrie pour le Till d'Eastman.

5.2.5. Variation de la vitesse en fonction du diamètre D_{50}

Compte tenu des analyses faites sur les quatre (4) sables étudiés, il est apparu de façon claire que le diamètre des particules D_{50} avait une influence sur la vitesse des ondes de cisaillement et aussi sur les modules de cisaillement et oedométrique. En effet, la vitesse des ondes de cisaillement augmente avec le diamètre moyen des particules de sol (D_{50}). La Figure 5. 31 montre cette augmentation en prenant compte de l'indice de densité de chaque sol.

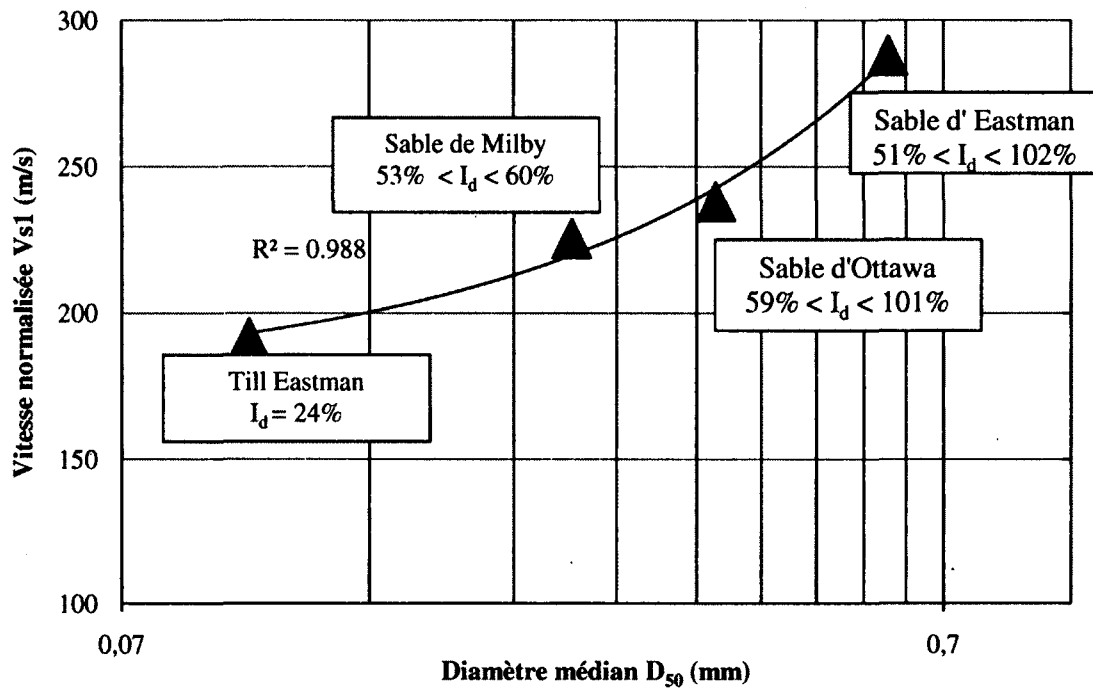


Figure 5. 31 : variation de la vitesse normalisée en fonction du diamètre médian D_{50} .

5.3 Conclusions générales

Les essais réalisés au cours de cette étude permettent de dégager un bon nombre de conclusions :

- La vitesse des ondes de cisaillement (V_s) augmente avec l'augmentation de la contrainte verticale.
- La vitesse normalisée diminue avec l'augmentation de l'indice des vides.
- Le diamètre médian D_{50} influe sur les vitesses d'ondes et aussi sur les modules de cisaillement et les modules œdométriques; V_s augmente avec l'augmentation du D_{50}
- Le rapport E_{oed}/G_{max} donne des valeurs constantes pour des contraintes supérieures à 100 kPa. Ces constantes varient selon le type de sable utilisé et selon le degré de densification du matériau en place. Il existe donc une fonction $E_{oed}/G_{max} = f(\sigma)$ et pour des $\sigma < 100$ kPa $E_{oed}/G_{max} = cste$
- Il existe une relation de linéarité entre le module œdométrique (E_{oed}) et le module de cisaillement (G_{max}). Cette linéarité peut se traduire par une droite de la forme $(ax + b)$.

CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS

Dans ce mémoire, il a été montré qu'il existe une multitude de méthode qui permettent la caractérisation des sols au moyen des vitesses d'ondes de cisaillement. Cependant, ces méthodes donnent des résultats très contradictoires. Malgré les différentes méthodes d'interprétations des signaux, il s'avère toujours difficile pour un même sol d'arriver à un même résultat de vitesses.

Afin de mieux comprendre ce phénomène, il a été choisi d'évaluer l'influence de la granulométrie des sables sur les vitesses des ondes de cisaillement des sols granulaires. Pour ce faire, il a été étudié 4 sols granulaires ayant des caractéristiques différentes. Il s'agit principalement du sable d'Ottawa (C-190) ($D_{50}= 0,37$ mm et $C_u=1,96$), du sable de Milby ($D_{50}= 0,247$ mm et $C_u= 3,2$), du sable Eastman ($D_{50} = 0,6$ mm et $C_u = 11,05$ et, du till Eastman ($D_{50} = 0,1$ mm et $C_u = 22$). Il a été réalisé sur ces sables des essais œdométriques et des essais ring Actuator développés à l'université de Sherbrooke. Ces essais ont été faits dans une cellule œdométrique équipée d'un dispositif d'anneaux piézoélectriques. Les résultats de cette étude ont montré clairement que :

- Pour un sol donné, la vitesse des ondes de cisaillement est un paramètre directement relié à son état de densité, à sa contrainte effective et à la grosseur de ses particules de sols. En effet, il a été constaté que pour un certain état de densité, V_s augmente avec l'augmentation du D_{50} . Cette augmentation suit une courbe parabolique dont la fonction sera à déterminer dans les recherches futures.
- Il existe une relation linéaire entre le module œdométrique et le module de cisaillement. Cette relation peut être traduite par deux fonctions linéaires:
 - une donnant l'un des modules en fonction de $G_{max}= f(E_{oed})$
 - une autre donnant le rapport du module œdométrique sur le module de cisaillement en fonction de la contrainte verticale ($E_{oed}/G_{max} = f(\sigma)$).

En somme, la vitesse des ondes de cisaillement peut nous renseigner sur la rigidité du sol. Il serait pertinent pour les projets futurs de trouver une relation exhaustive entre le rapport E_{oed}/G_{max} et la contrainte verticale σ . De plus, il serait aussi important d'établir les corrélations qui existent entre le diamètre moyen D_{50} et la vitesse de cisaillement.

LISTES DES RÉFÉRENCES

Ahn, J., Biscontin, G. et Roeset, J. M. (2008). Wave propagation under vertically excited surface foundation. Dans *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV Congress 2008 - Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, May 18, 2008 - May 22*. American Society of Civil Engineers, Sacramento, CA, United states

Anon (1978). DYNAMIC GEOTECHNICAL TESTING, *ASTM Special Technical Publication* 1977.

Arulnathan, R., Boulanger, R. W., Kutter, B. L., and Sluis, W. (2000) New Tool for Shear Wave Velocity Measurements in Model Tests, *Geotech. Test. J.*, ASTM, Vol. 23, No. 4, p. 444–453.

Ballard Jr., R. F. (1976). Method For Crosshole Seismic Testing. *American Society of Civil Engineers, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, volume 102, numéro 12, p. 1261-1273.

Blewett, J., Blewett, I. J. et Woodward, P. K. (2000). Phase and amplitude responses associated with the measurement of shear-wave velocity in sand by bender elements. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 37, numéro 6, p. 1348-1357.

Brignoli, E. G. M., Gotti, M. et Stokoe, K. H. (1996). Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers. *Geotechnical Testing Journal*, volume 19, numéro 4, p. 384-397.

Brocanelli, D., and Rinaldi, V., (1998), Measurement of Low-Strain Material Damping and Wave Velocity with Bender Elements in the Frequency Domain, *Can. Geotech. J.*, Vol. 35, p. 1032–1041.

Cascante, G., Vanderkooy, J. et Chung, W. (2005). A new mathematical model for resonant-column measurements including eddy-current effects. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 42, numéro 1, p. 121-135.

Cascante, G., and Santamarina, J. C., (1996), “Interparticle Contact Behavior and Wave Propagation,” *J. Geotech. Engrg.*, Vol. 122, No. 10, p. 831–839.

Challouf, W. (2009). Caractérisation des sols granulaires au moyen de la vitesse des ondes de cisaillement. *Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke (Canada), Canada*,

Clayton, C. R. I., Theron, M. et Best, A. I. (2004). The measurement of vertical shear-wave velocity using side-mounted bender elements in the triaxial apparatus. *Geotechnique*, volume 54, numéro 7, p. 495-498.

Chien, L. K., and Oh, Y. N., (2000), Laboratory and Field Shear Wave Measurement at a Reclaimed Site in West Taiwan, *Geotech. Test. J.*, Vol. 23, No. 1, p. 21–35.

DeAlba, P., Baldwin, K., Janoo, V., Roe, G., and Celikkol, B., (1984), Elastic-Wave Velocities and Liquefaction Potential, *Geotech. Test. J.*, Vol. 7, No. 2, p. 77-87.

Dyvik, R. et Madshus, C. (1985). LAB MEASUREMENTS OF G_{max} USING BENDER ELEMENTS. Dans *Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions. Proceedings of a session held in conjunction with the ASCE Convention*. ASCE, Detroit, MI, Engl, p. 186-196.

Ethier, Y. A. (2009). la mesure en laboratoire de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement. *Universite de Sherbrooke (Canada), Universite de Sherbrooke (Canada), Canada*,

Gamal El-Dean D. (2007). Development of a new piezo-electric pulse testing device and soilcharacterization using shear waves, These de doctorat en genie civil, Universite de Sherbrooke.

Gori, U. et Mari, M. (2001). The correlation between the fractal dimension and internal friction angle of different granular materials. *Soils and Foundations*, volume 41, numéro 6, p. 17-23.

Huang, Y. T., Huang, A. B., Kuo, Y. C., and Tsai, M. D., 2004, A Laboratory Study on the Undrained Strength of a Silty Sand from CentralWestern Taiwan, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, Vol. 24, p. 733-743.

Hardin, B. O. et Black, W. L. (1968). Vibration modulus of normally consolidated clay. *American Society of Civil Engineers Proceedings, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, volume 94, p. 353-369.

Hardin, B. O. et Richart, J., F.E. (1963). Elastic wave velocities in granular soils. *ASCE -- Proceedings -- Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, volume 89, p. 33-65.

Hardin, B. O. et Drnevich, V. P. (2002). Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves. Dans *A History of Progress: Selected U.S. Papers in Geotechnical Engineering*. American Society of Civil Engineers, United states, p. 1459-1484.

Hasancebi, N. et Ulusay, R. (2007). Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, volume 66, numéro 2, p. 203-213.

ISHIHARA, K. (1996) Soil behavior in earthquake geotechnics, Oxford University Press inc.,NewYork, États-Unis, p. 360.

Ismail, M. A., Sharma, S. S., and Fahey, M., (2005), A Small True Triaxial Apparatus withWaveVelocity Measurement, *Geotech. Test. J.*, Vol. 28, No. 2, p. 1-10.

Iwasaki, T., Tatsuoka, F., and Taragi, Y., (1978), Shear Moduli of Sands Under Cyclic Torsional Shear Loading, *Soils Found.*, Vol. 18, No. 1, p. 39-56.

Jovicic, V. et Coop, M. R. (1997). Stiffness of coarse-grained soils at small strains. *Geotechnique*, volume 47, numéro 3, p. 545-561.

KARRAY, M., LEFEBVRE, G. (2008) Significance and evaluation of Poisson's ratio in Rayleigh wave testing, *Revue canadienne de géotechnique, Canada*, vol. 45, no. 5, p. 624-635.

Karl, L., Haegeman, W., Degrande, G. et Dooms, D. (2008). Determination of the material damping ratio with the bender element test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, volume 134, numéro 12, p. 1743-1756.

Lee, J. -. et Santamarina, J. C. (2005). Bender elements: Performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, volume 131, numéro 9, p. 1063-1070.

Lee, J. et Santamarina, J. C. (2005). Bender elements: Performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, volume 131, numéro 9, p. 1063-1070.

Leong, E. C., Yeo, S. H. et Rahardjo, H. (2005). Measuring shear wave velocity using bender elements. *Geotechnical Testing Journal*, volume 28, numéro 5, p. 488-498.

Lings, M. L. et Greening, P. D. (2001). A novel bender/extender element for soil testing. *Geotechnique*, volume 51, numéro 8, p. 713-717.

Liu, N. et Mitchell, J. K. (2006). Influence of nonplastic fines on shear wave velocity-based assessment of liquefaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, volume 132, numéro 8, p. 1091-1097.

Long, M. et Donohue, S. (2007). In situ shear wave velocity from multichannel analysis of surface waves (MASW) tests at eight Norwegian research sites. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 44, numéro 5, p. 533-544.

Mancuso, C. (1989). Numerical analysis of in situ S-wave measurements. Dans *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, August 13, 1989 - August 18*, volume 1. Publ by A.A. Balkema, Rio de Janeiro, Br, p. 277-280.

Masao, K. (2006). Shear wave velocity in marine sediment. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, volume 45, numéro 5, p. 4824-4828.

Mohsin, A. K. M. and Airey, D. W., (2005), Influence of Cementation and Density on G_{max} for Sand, *Proceedings, 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*

Mok, Y. J., Sanchez-Salinero, I., Stokoe II, K. H. et Roesset, J. M. (1988). In situ damping measurements by crosshole seismic method. Dans *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground-Motion Evaluation: Proceedings of the Specialty Conference, June 27, 1988 - June 30*. Publ by ASCE, Park City, UT, USA, p. 305-320.

Patel, A., Bartake, P. P. et Singh, D. N. (2009). An empirical relationship for determining shear wave velocity in granular materials accounting for grain morphology. *Geotechnical Testing Journal*, volume 32, numéro 1, p. 1-10.

Patel, A., Singh, D. N. et Singh, K. K. (2010). Performance Analysis of Piezo-Ceramic Elements in Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, volume 28, numéro 5, p. 681-694.

RICHART, F.E., HALL, J.R., WOODS, R.D. (1970) *Vibrations of soils and foundations*, New Jersey, États-Unis, Prentice-Hall inc., 414 p.

Sahaphol, S., and Miura, S., (2004), Shear Moduli of Volcanic Soils, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, Vol. 20, p. 1-9.

SEED, H. B., IDRISS, I.M. (1970) Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, Berkeley, University of California, Rapport no. EERC p 70-10, 43.

Thepot, O. et Frank, R. (2000). Mesure du module en petites deformations d'un sol autour d'une conduite enteree: presentation d'un nouvel essai in situ. *Canadian geotechnical journal*, volume 37, numéro 4, p. 909-917.

Thevanayagam, S. (2007). Intergrain contact density indices for granular mixes-I: Framework. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, volume 6, numéro 2, p. 123-134.

Viggiani, G. et Atkinson, J. H. (1995). Stiffness of fine-grained soil at very small strains. *Geotechnique*, volume 45, numéro 2, p. 249-265.

Wei, B. Z., Pezeshk, S., Chang, T. S., Hall, K. H., and Liu, H. P., (1996), An Empirical Methods to Estimate ShearWave Velocity of Soils in the New Madrid Seismic Zone, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, Vol. 15, p. 399-408.

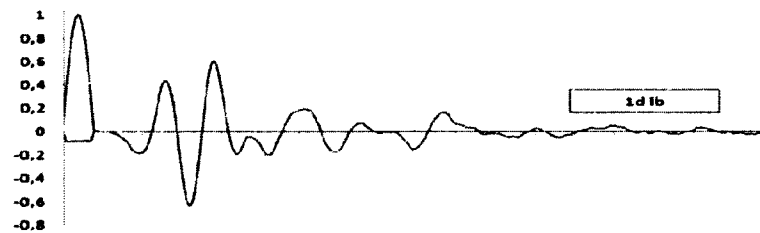
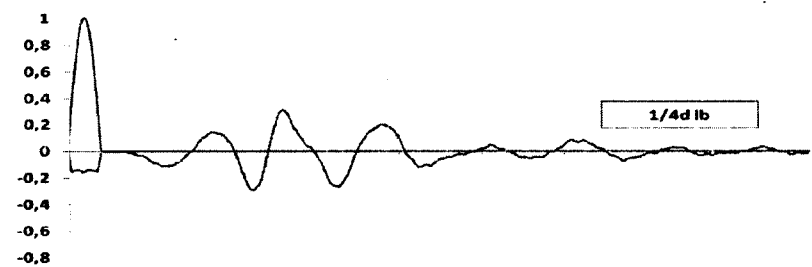
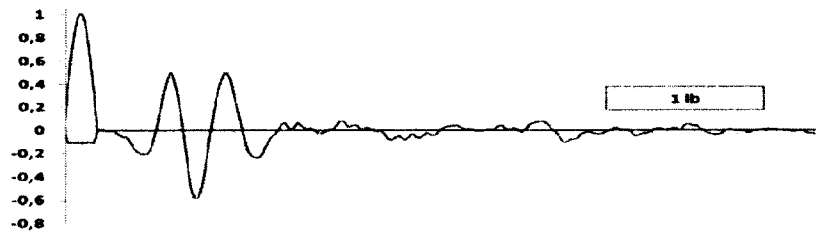
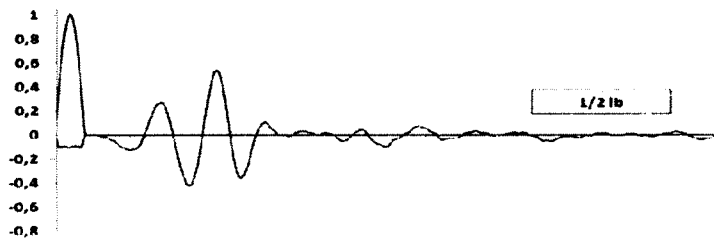
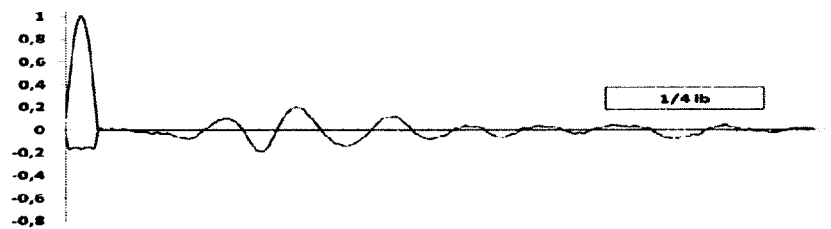
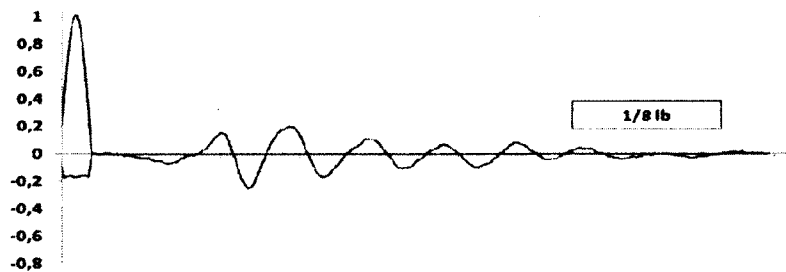
Wichtmann, T. and Triantafyllidis, Th., (2004), Influence of Cyclic and Dynamic Loading History on Dynamic Properties of Dry Sand, Part: I Cyclic and Dynamic Torsional Prestraining, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, Vol. 24, No. 2, p. 127-147.

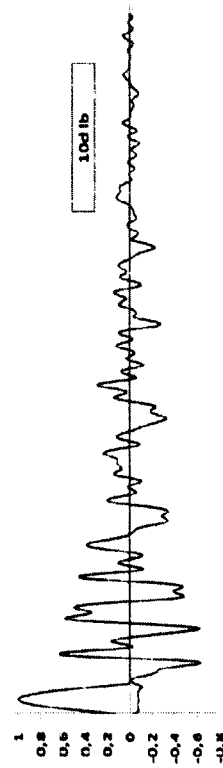
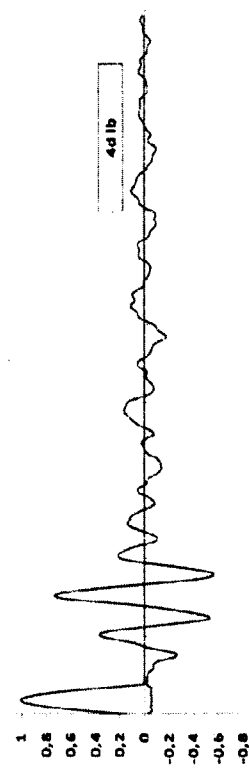
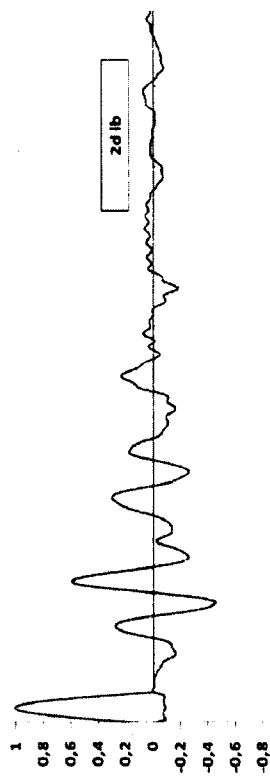
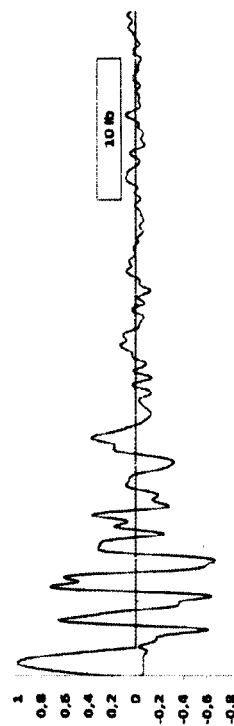
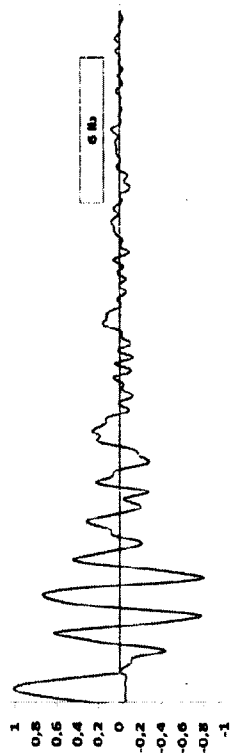
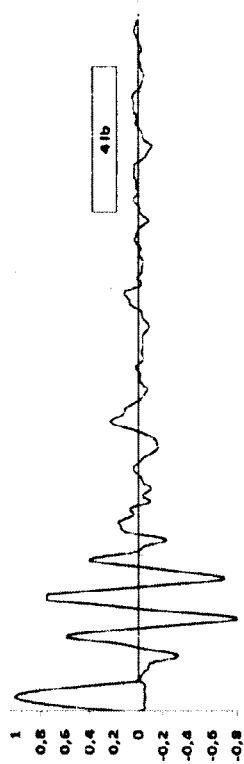
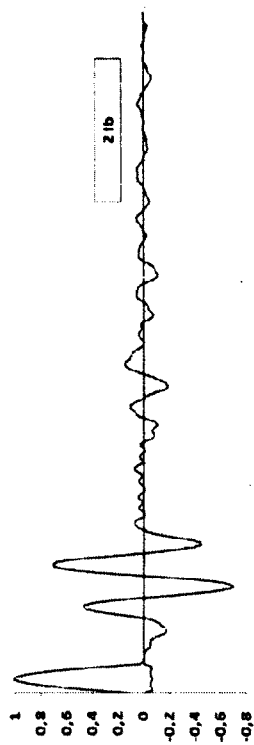
Youn, J., Choo, Y. et Kim, D. (2008). Measurement of small-strain shear modulus G_{max} of dry and saturated sands by bender element, resonant column, and torsional shear tests. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 45, numéro 10, p. 1426-1438.

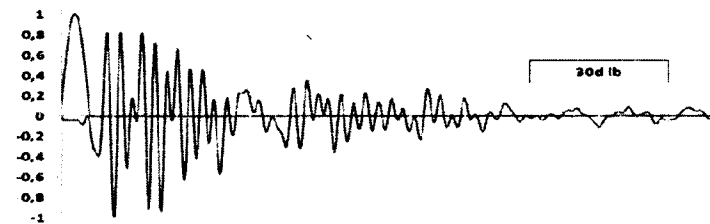
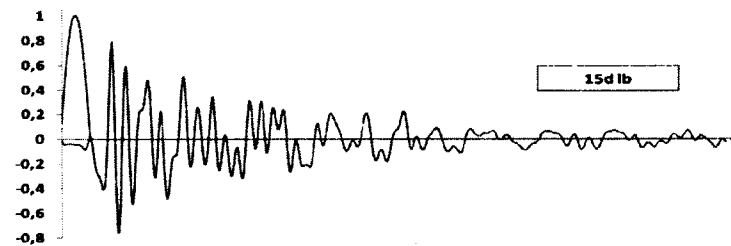
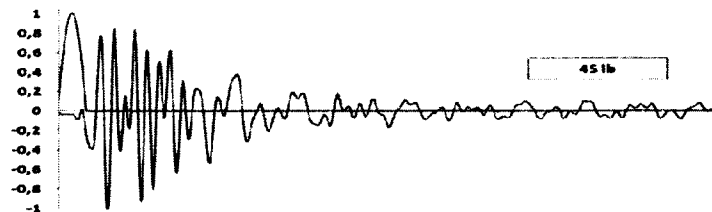
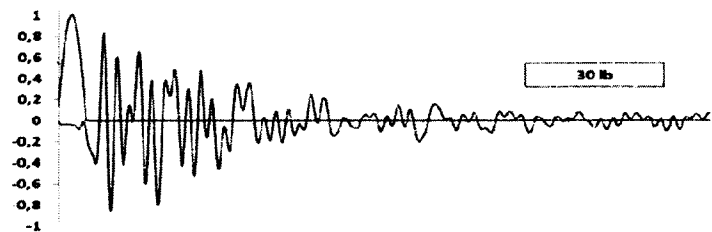
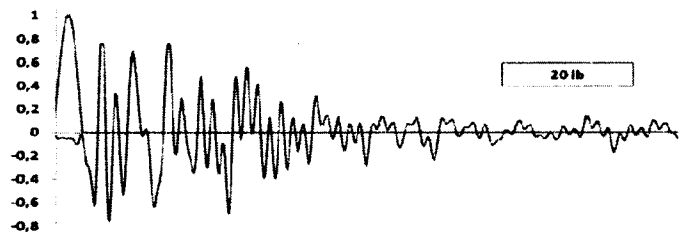
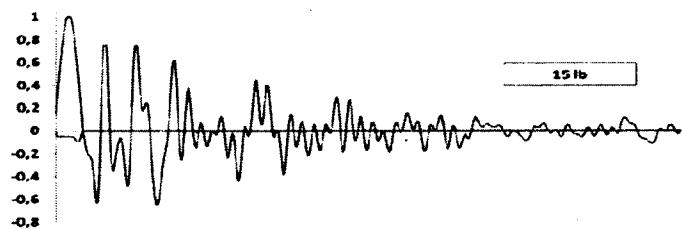
Zhou, Y. G. and Chen, Y. M., (2005), Influence of Seismic Cyclic Loading History on Small Strain Shear Modulus of Sands, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, Vol. 25, p. 341-35.

ANNEXES

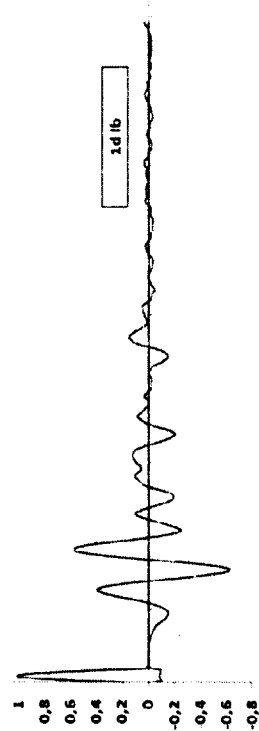
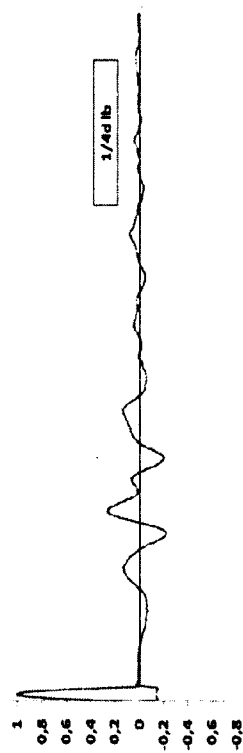
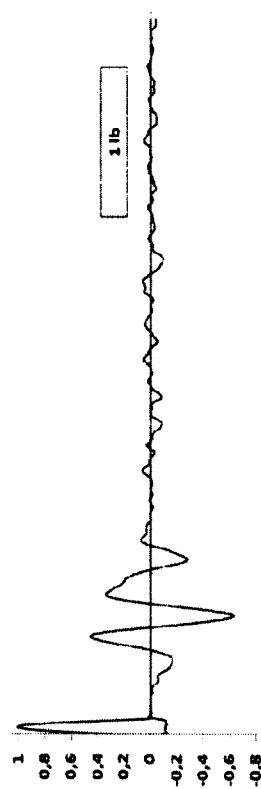
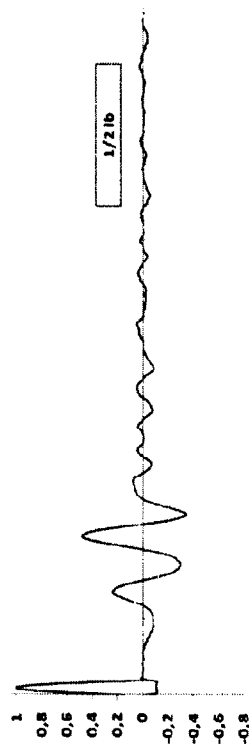
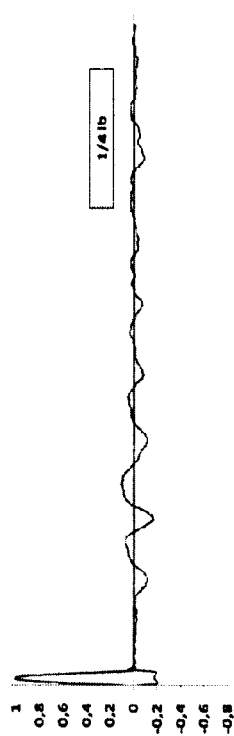
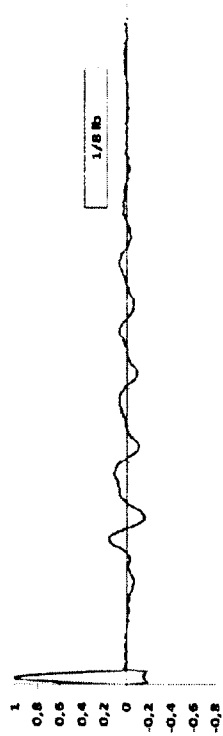
Signaux enregistrés

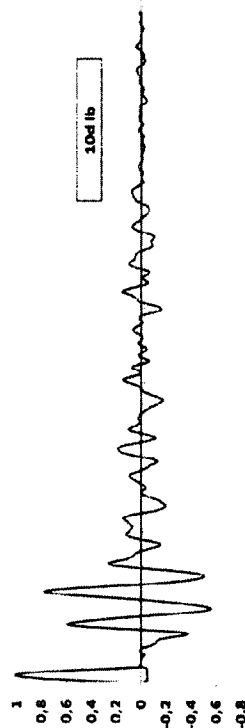
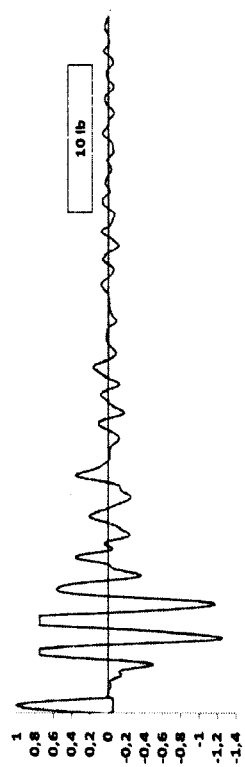
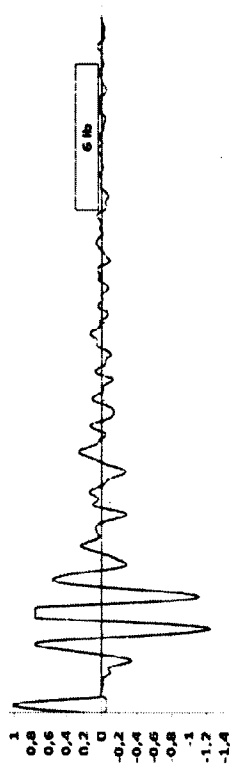
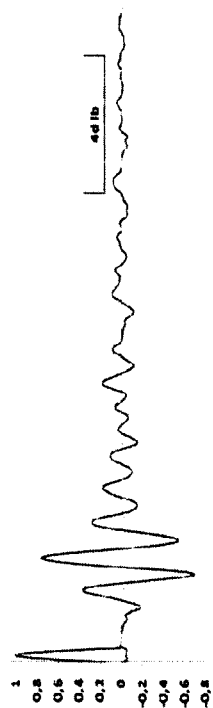
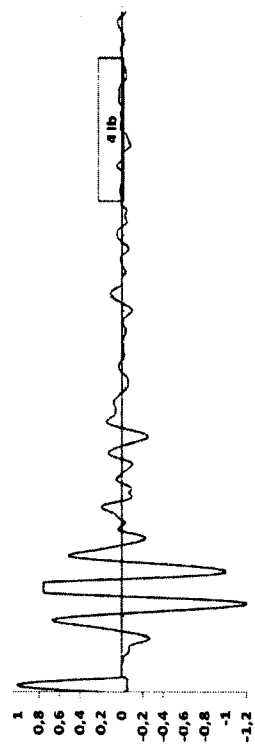
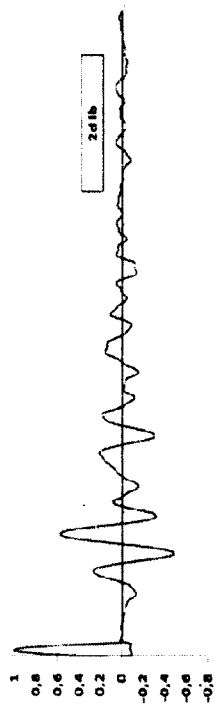
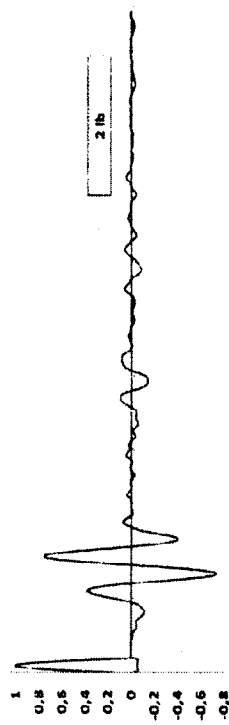


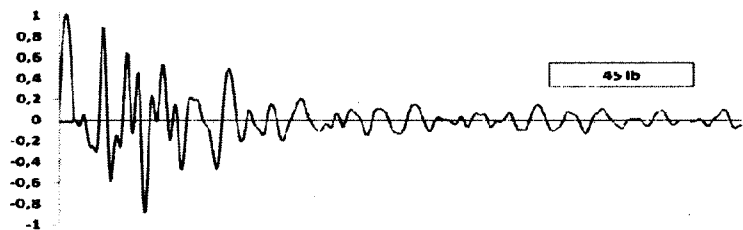
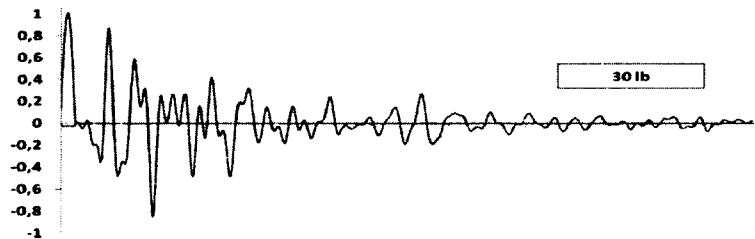
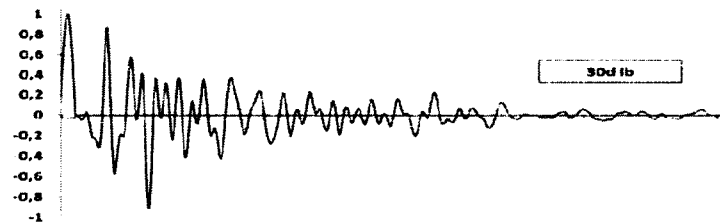
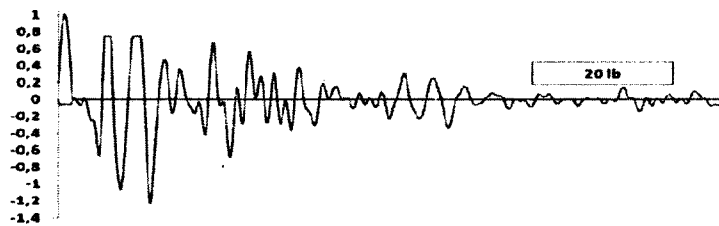
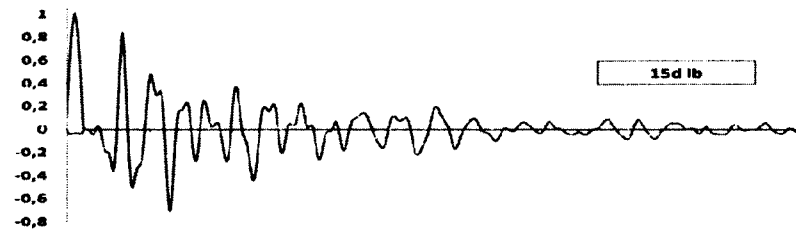
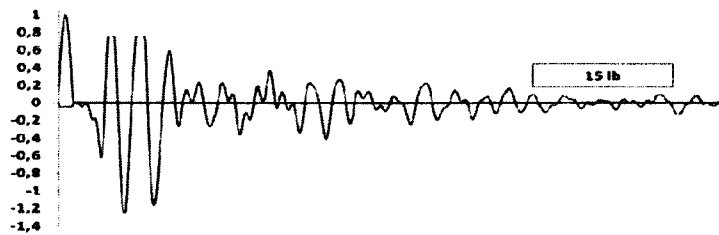




chargement
2,5 KHz

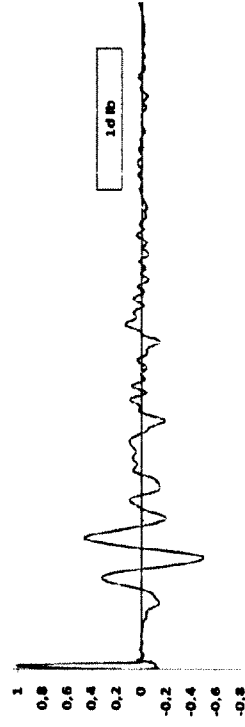
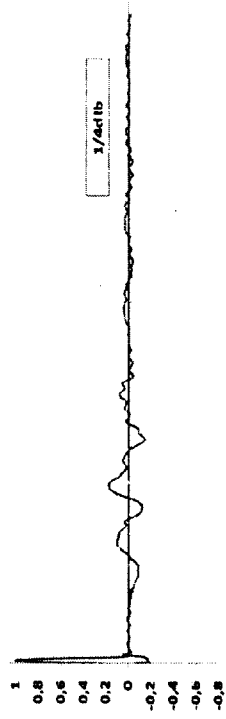
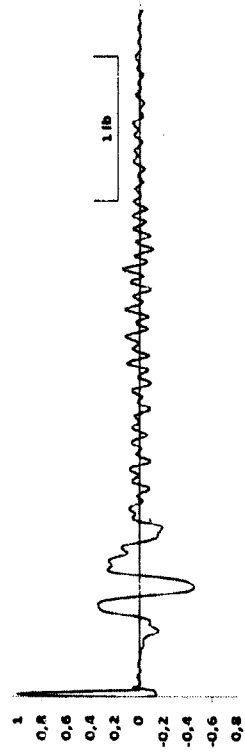
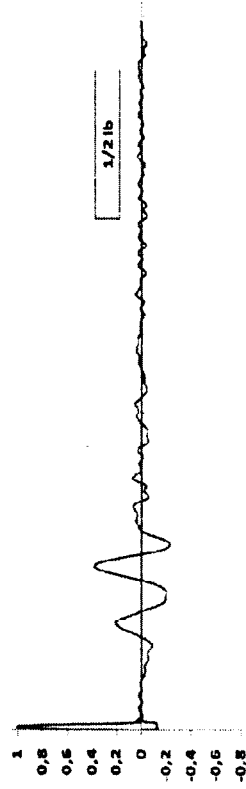
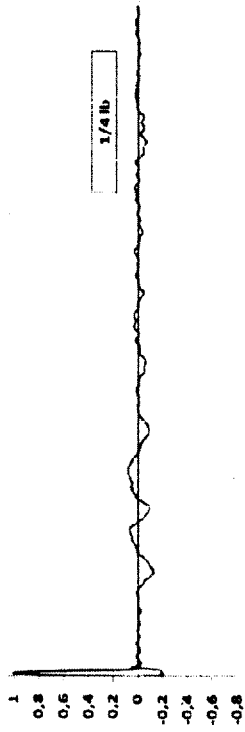
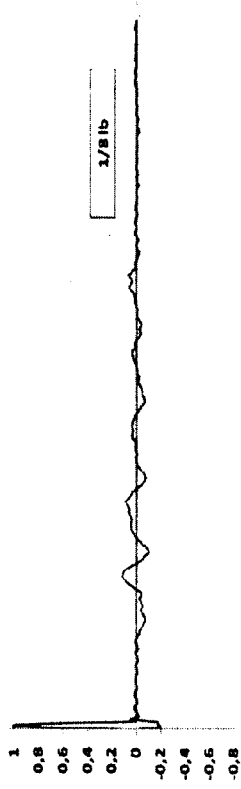


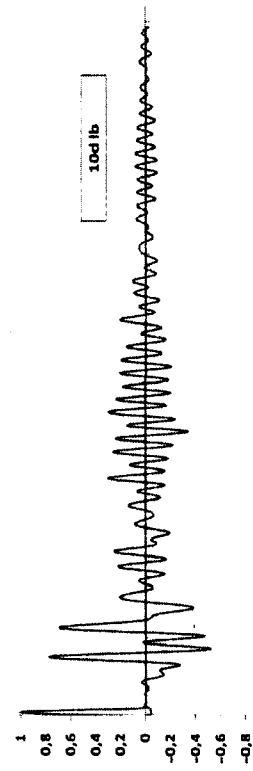
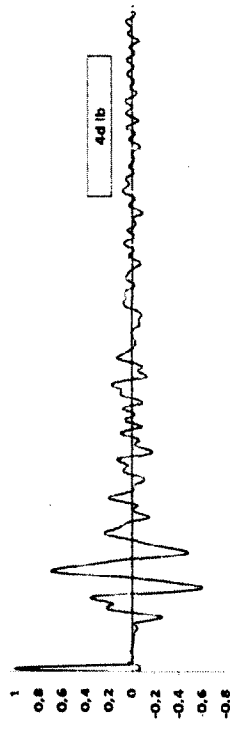
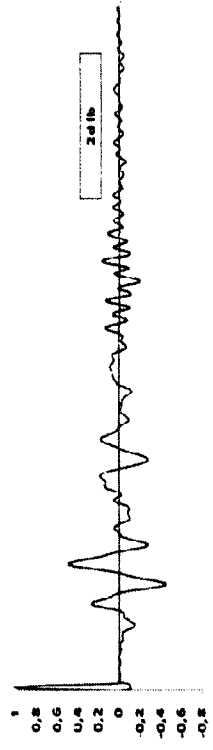
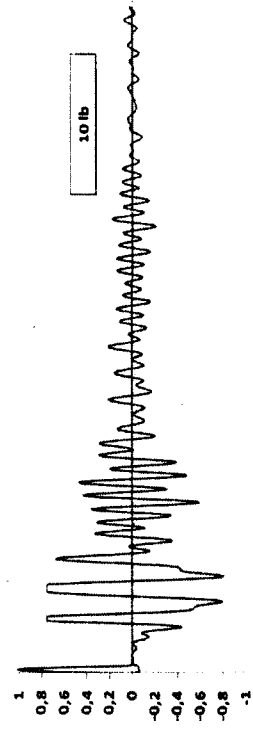
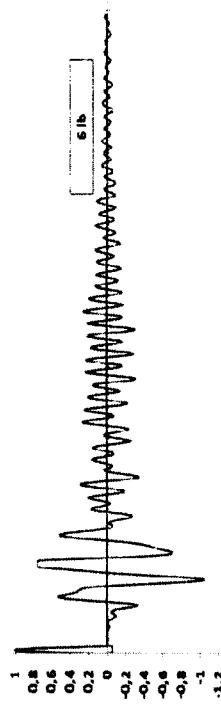
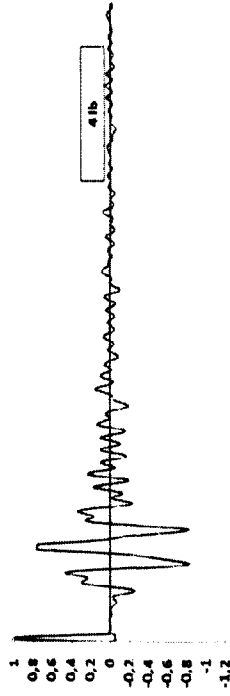
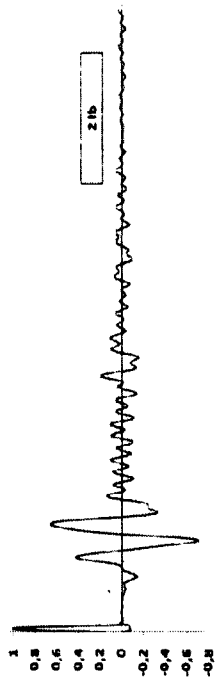


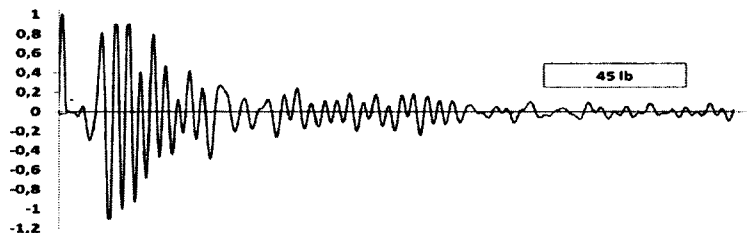
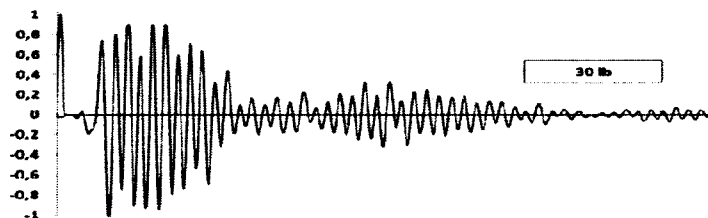
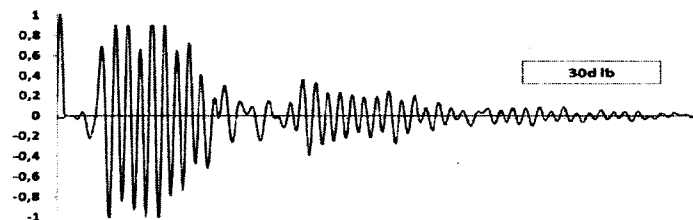
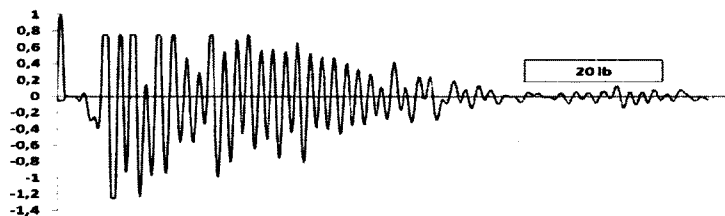
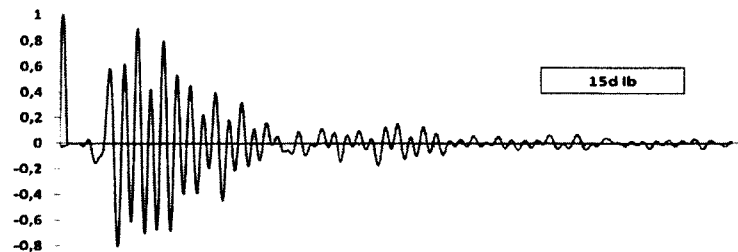
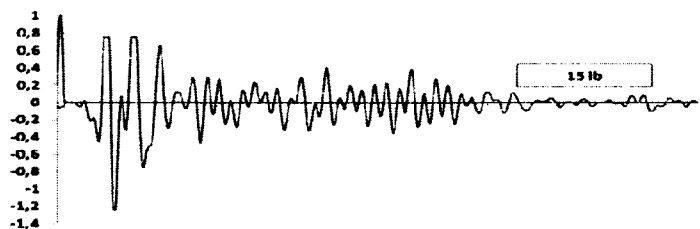


nt

Déchargement
le 25 KHz

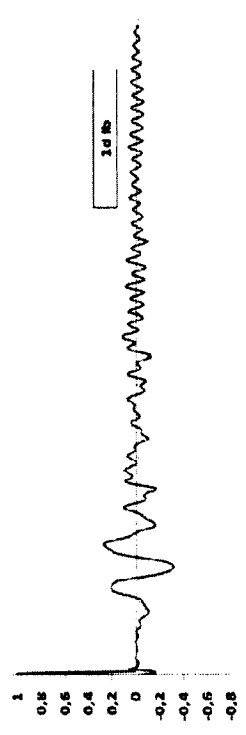
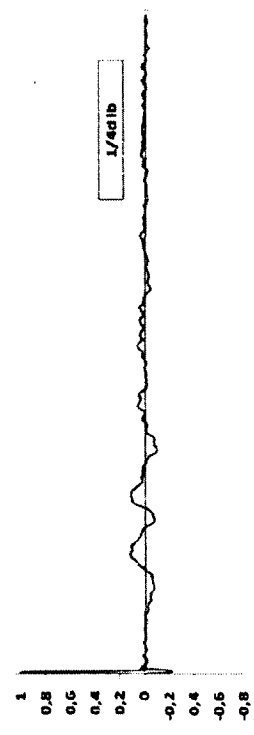
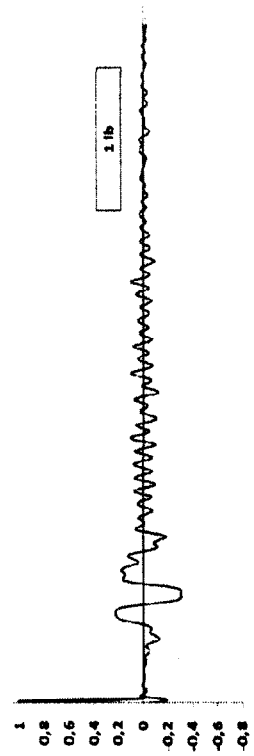
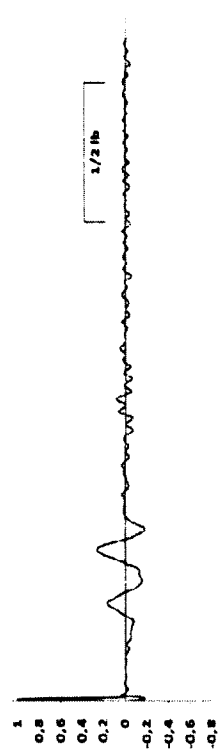
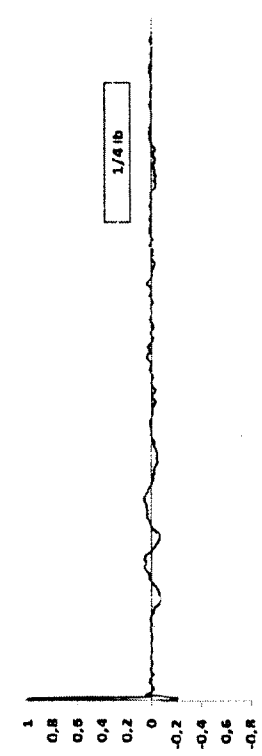
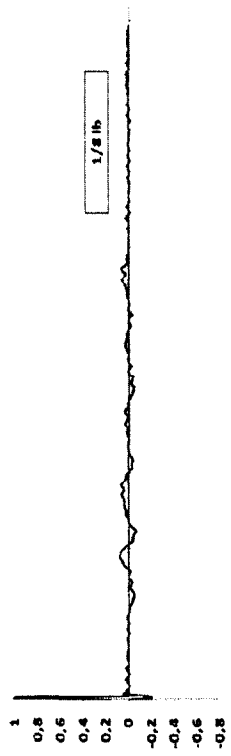


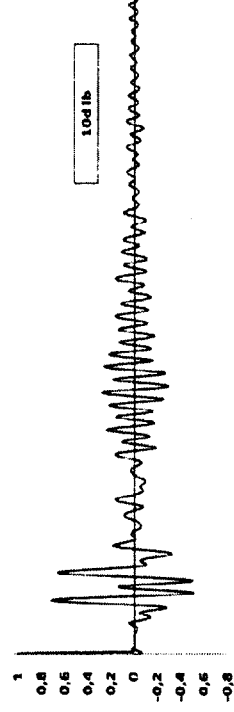
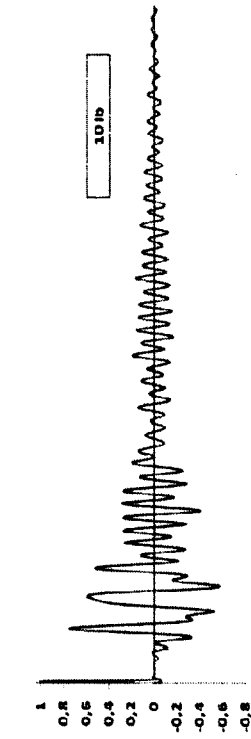
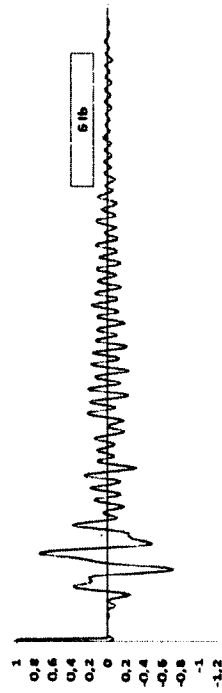
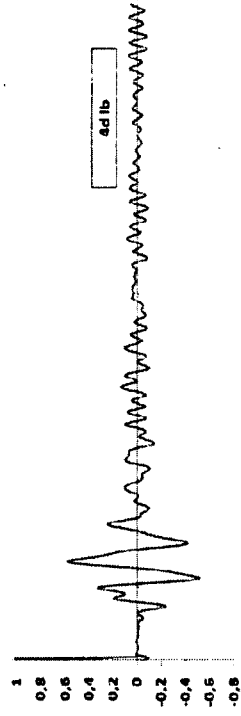
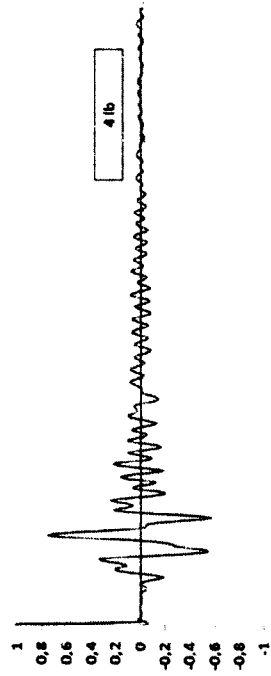
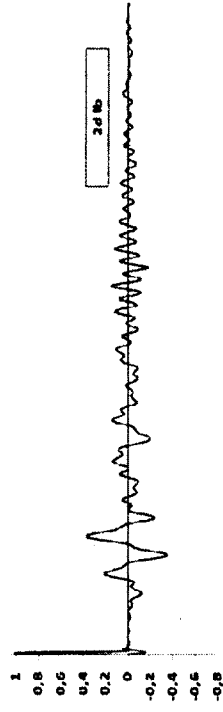
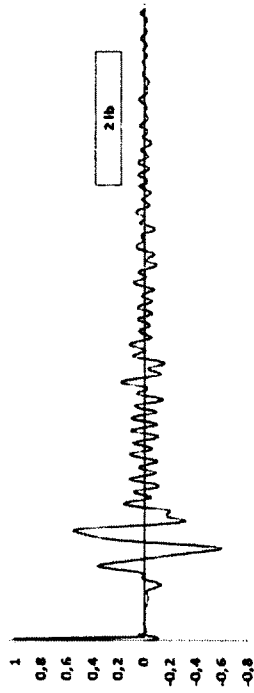


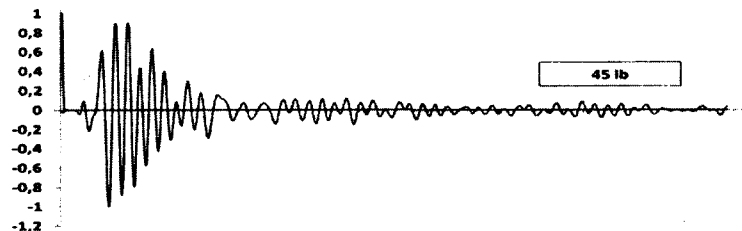
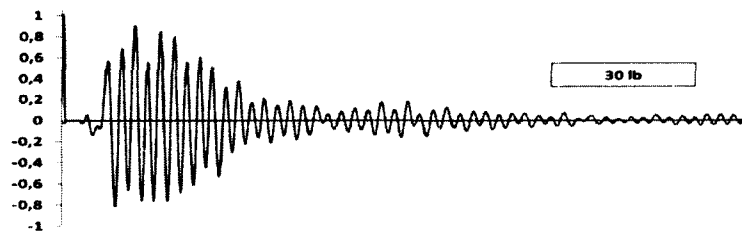
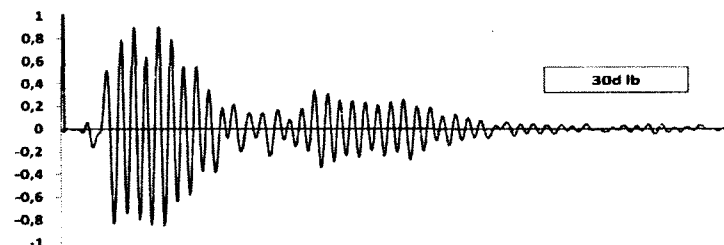
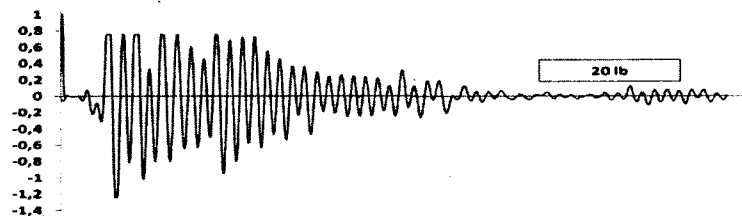
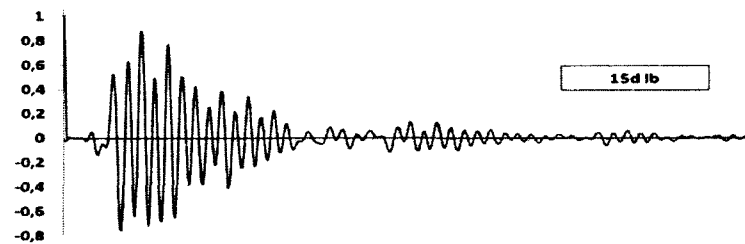
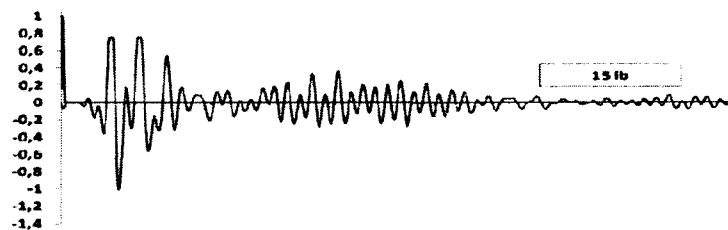


nent
z

3. Déchargement
n de 50 KHz

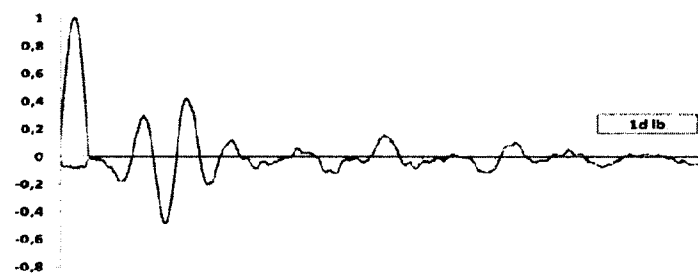
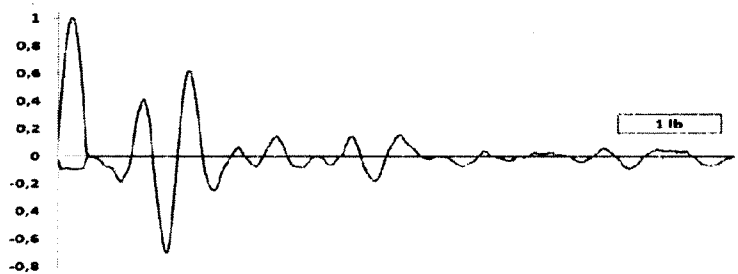
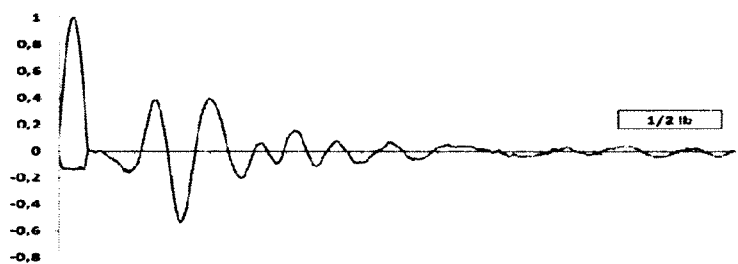
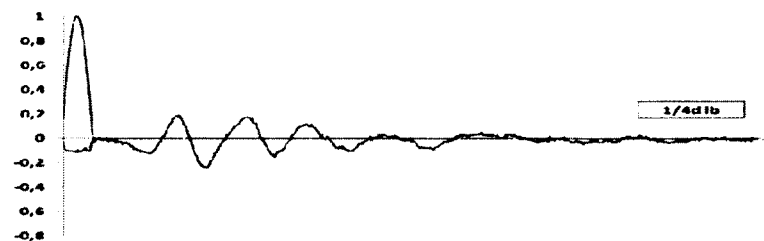
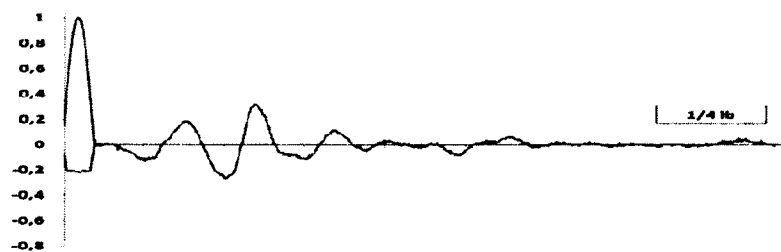


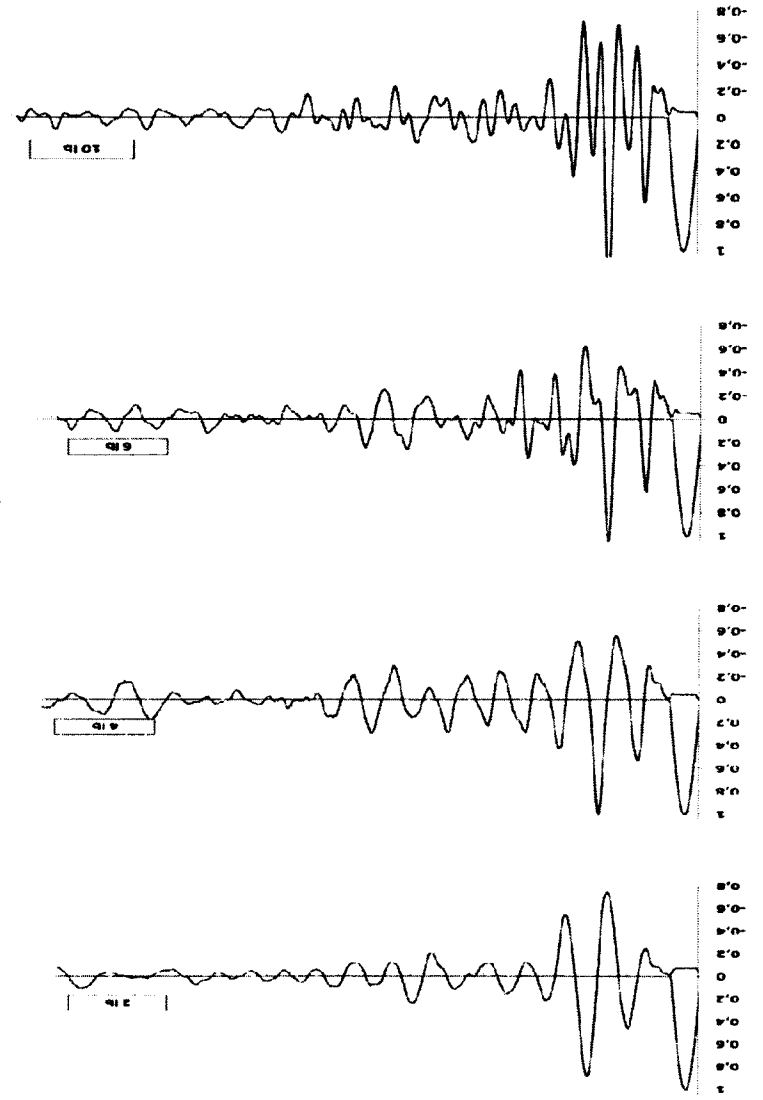
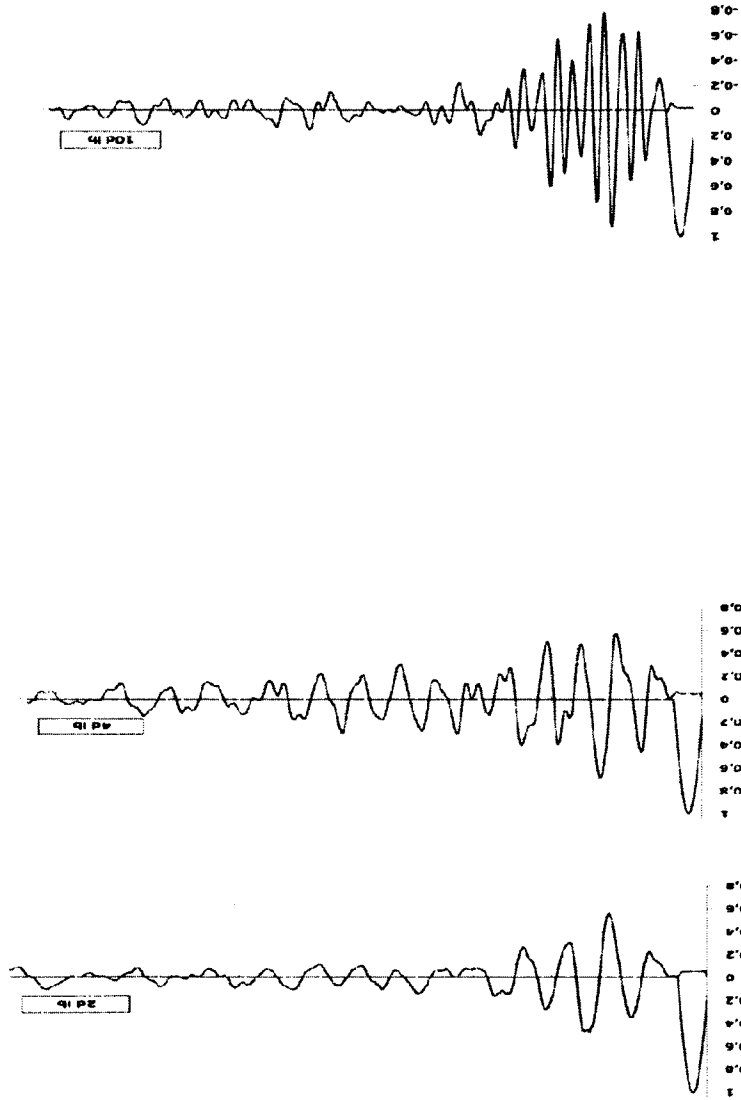


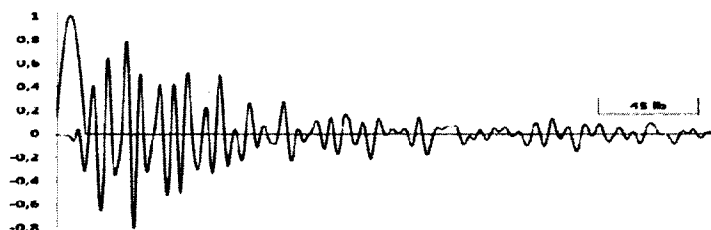
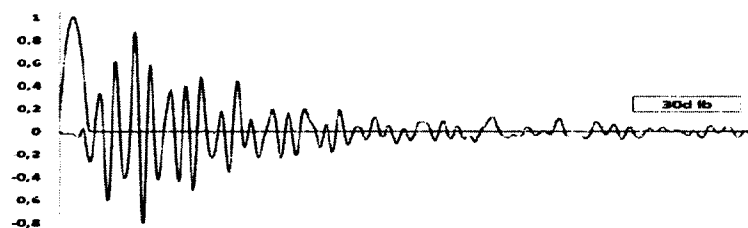
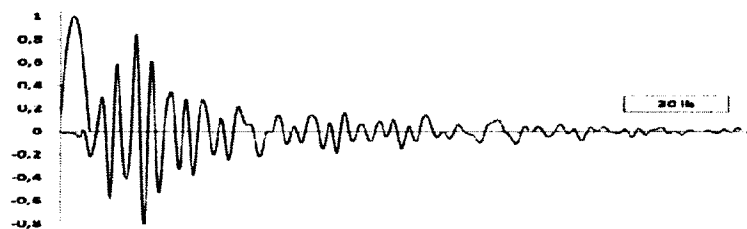
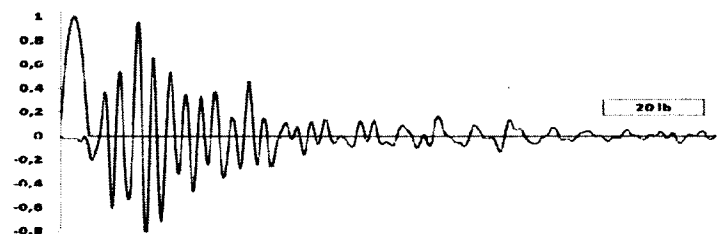
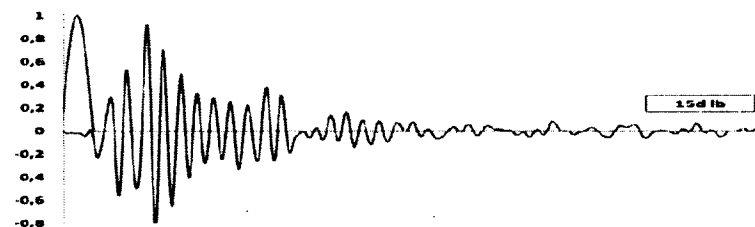
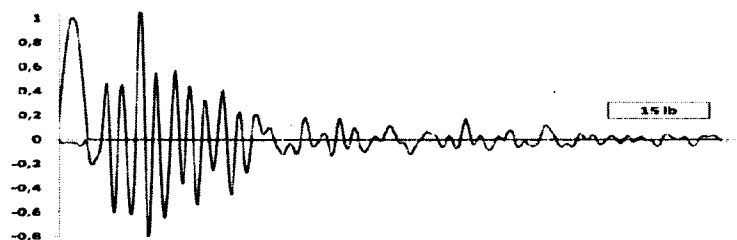


nt

rgement
KHz



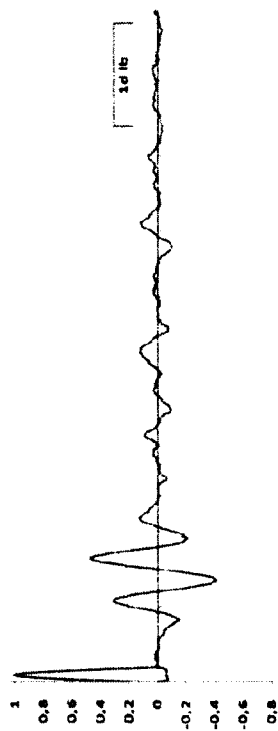
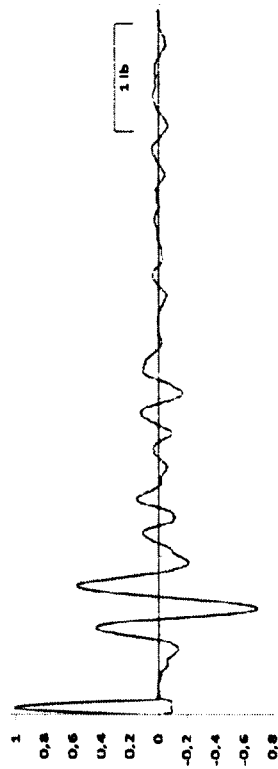
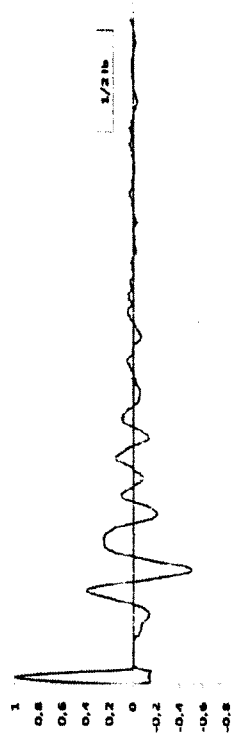
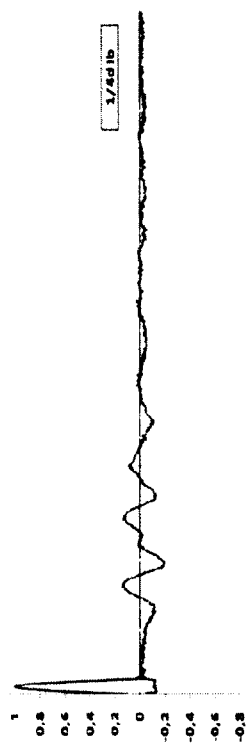
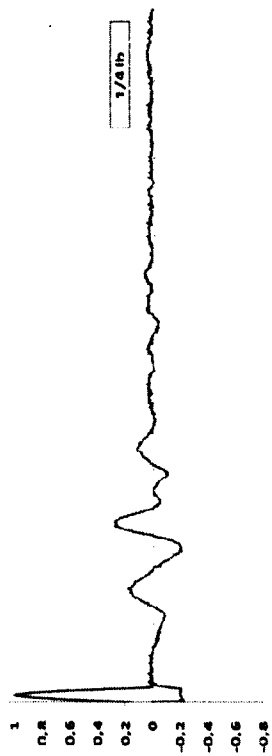


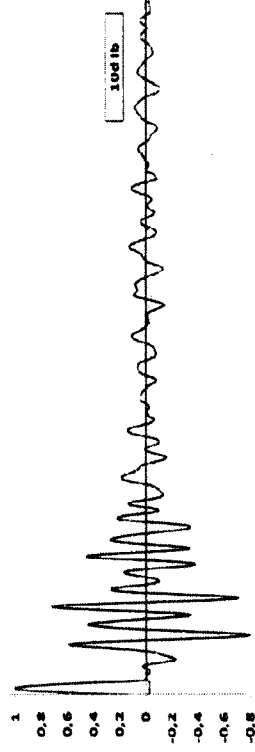
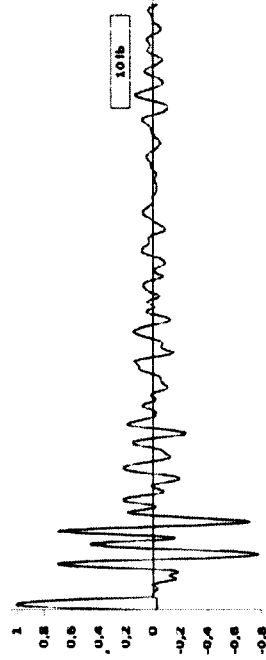
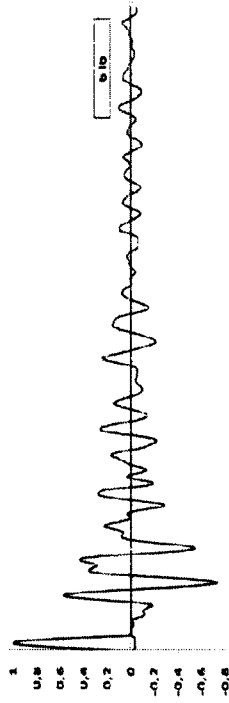
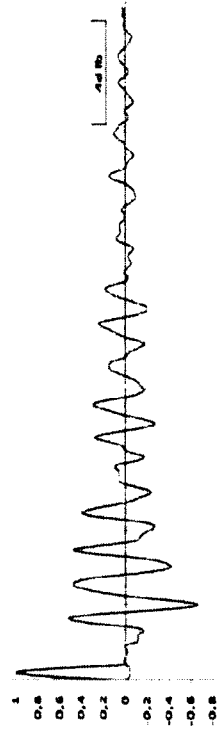
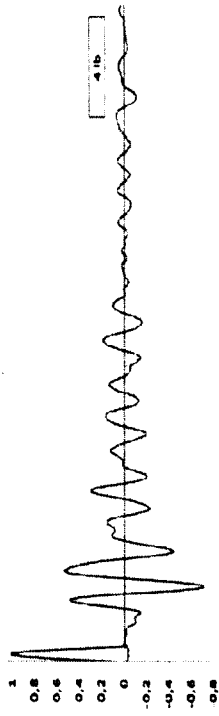
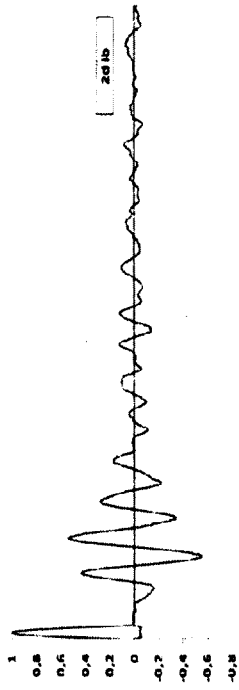
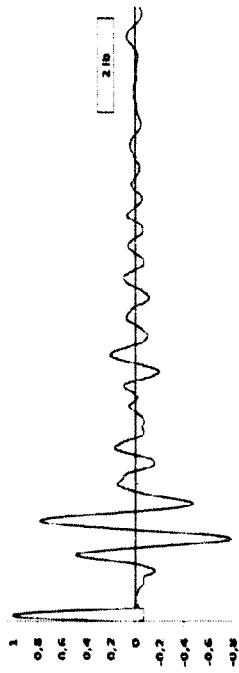


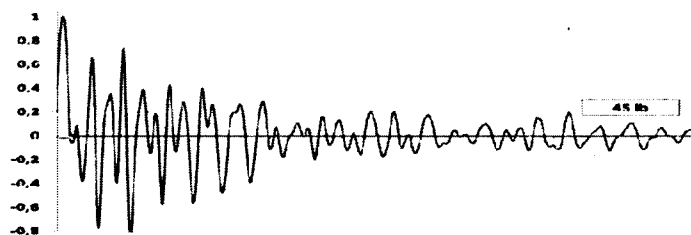
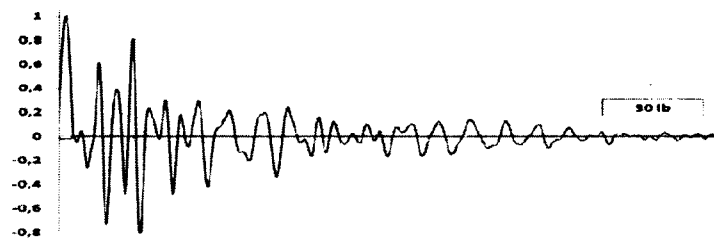
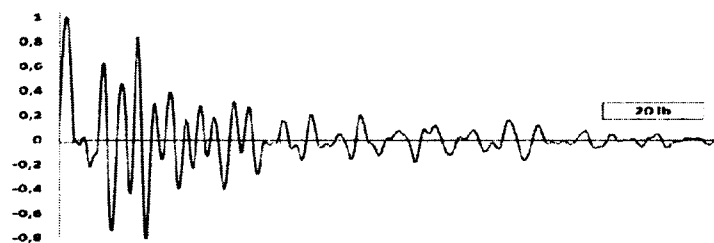
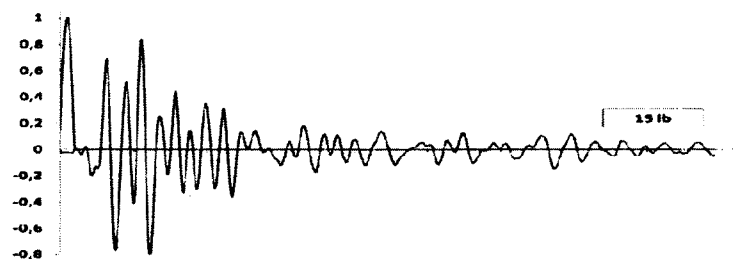
nt

Déchargement

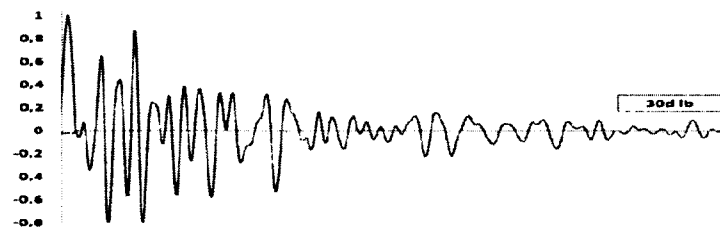
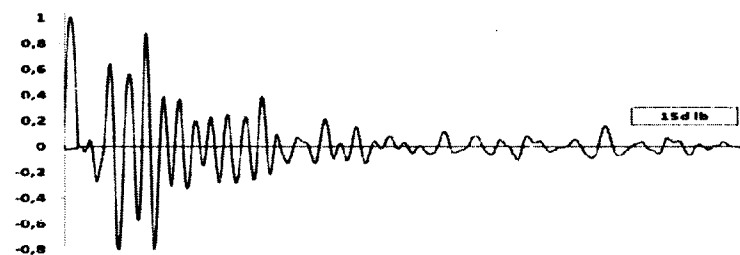
2,5 KHz



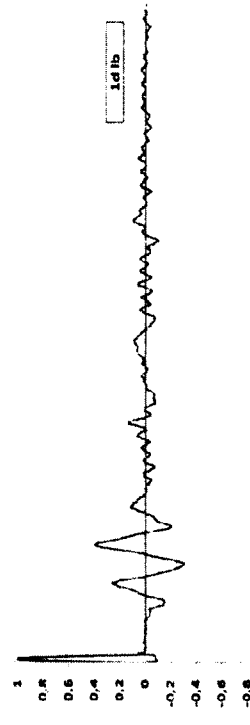
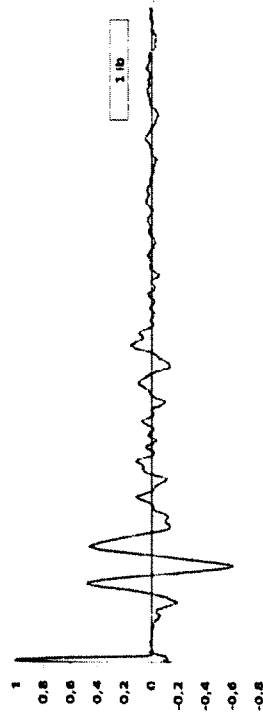
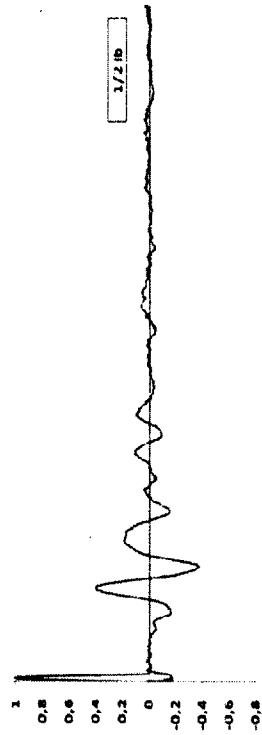
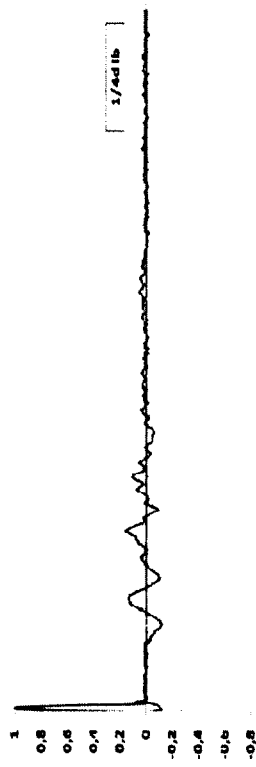
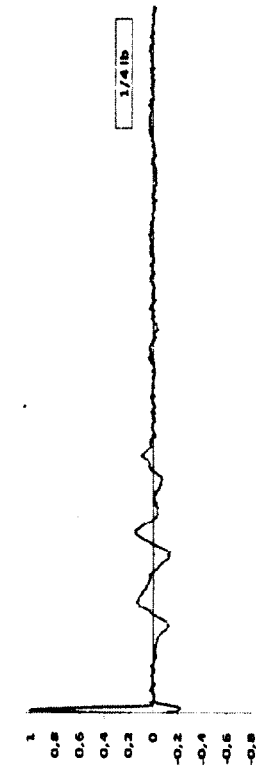


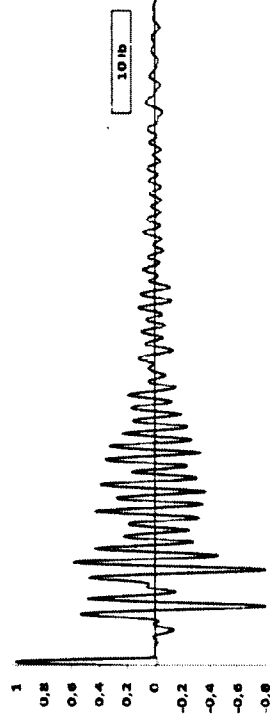
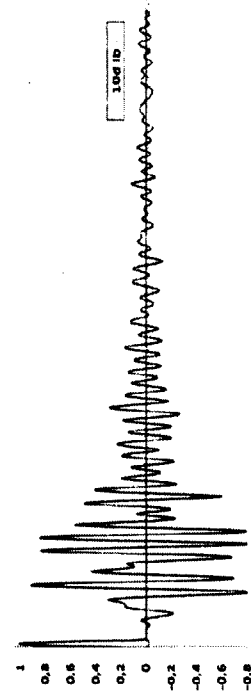
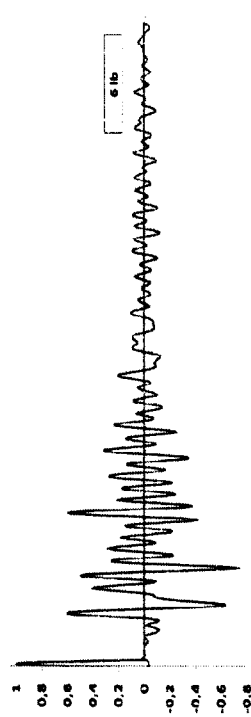
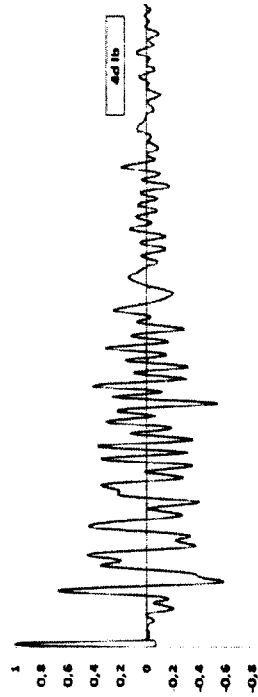
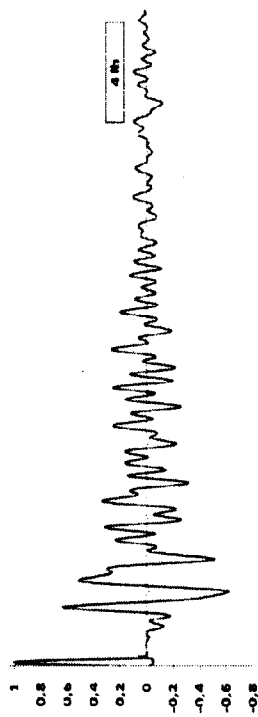
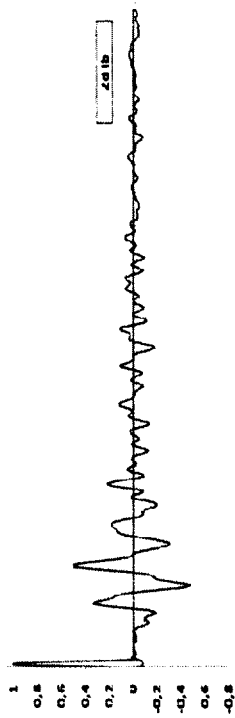
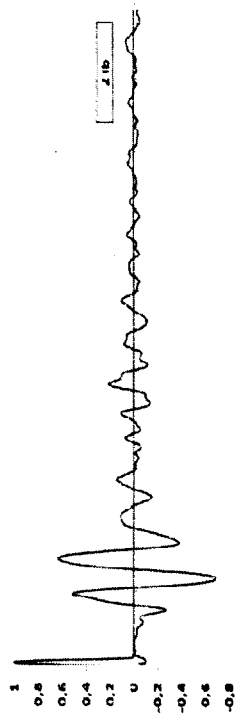


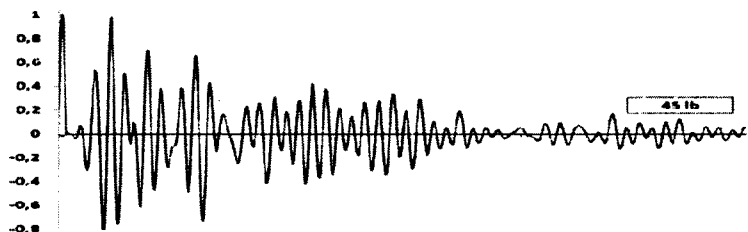
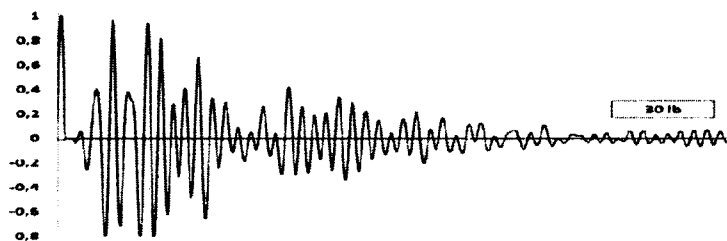
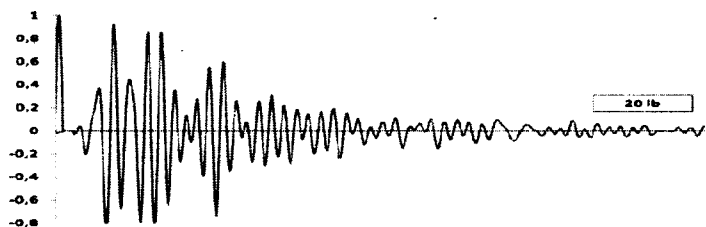
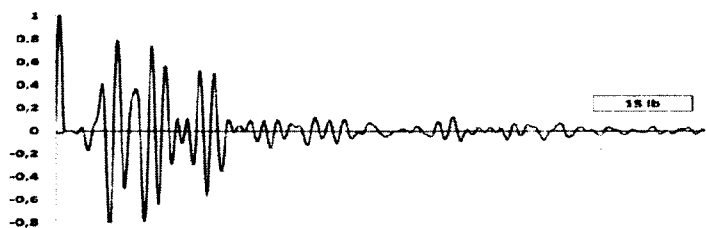
nent



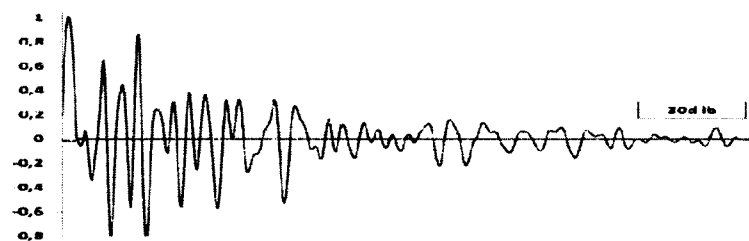
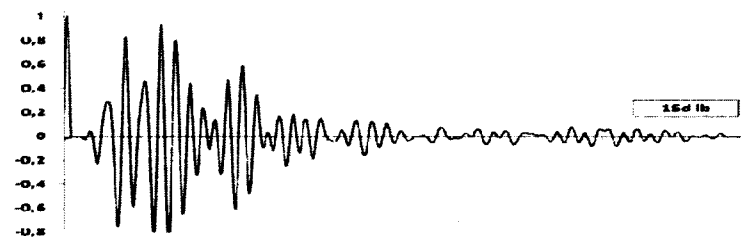
e. Déchargement
le 25 KHz





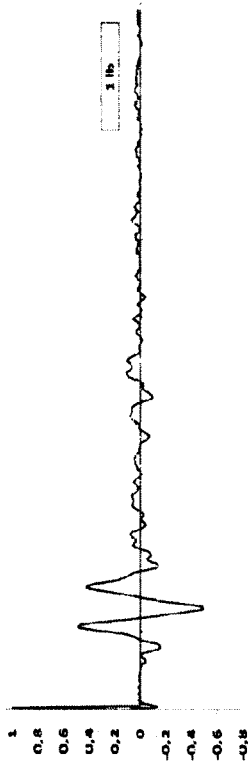
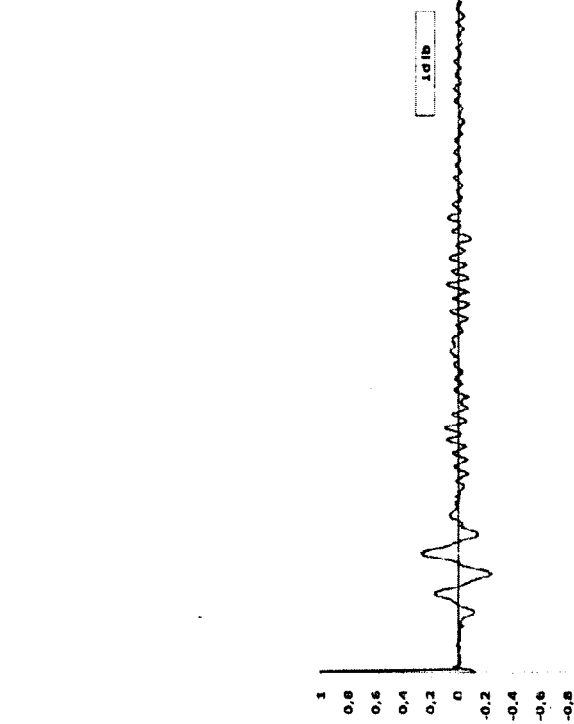
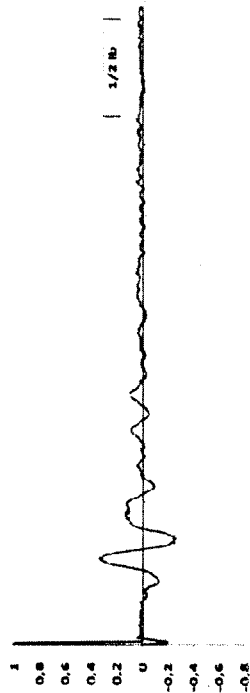
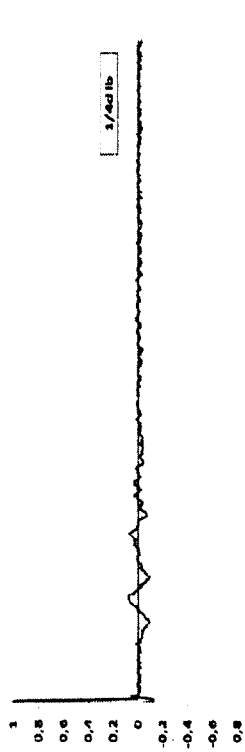
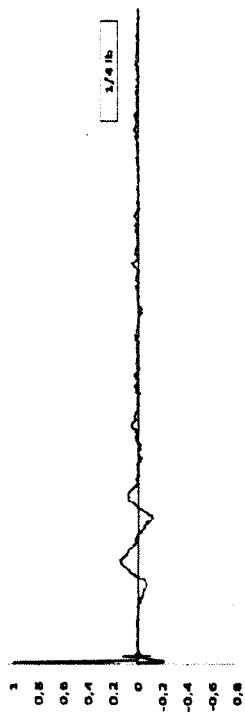


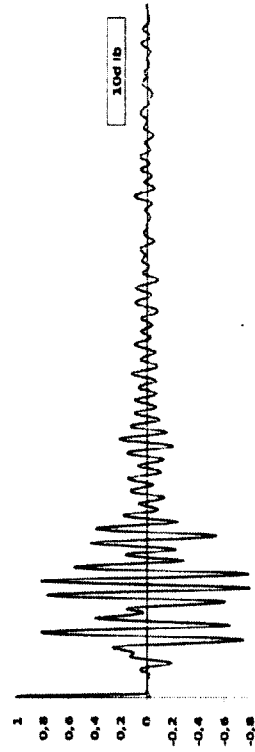
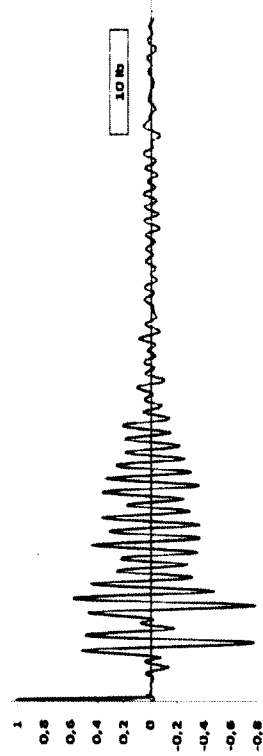
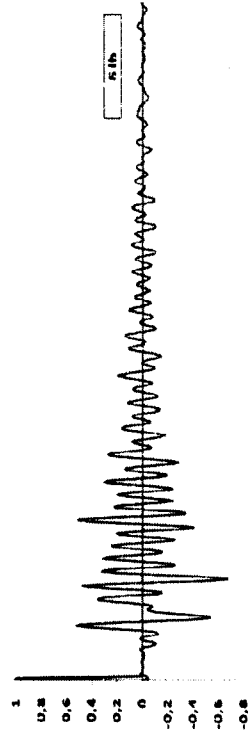
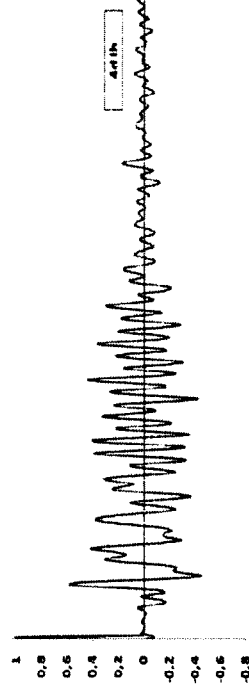
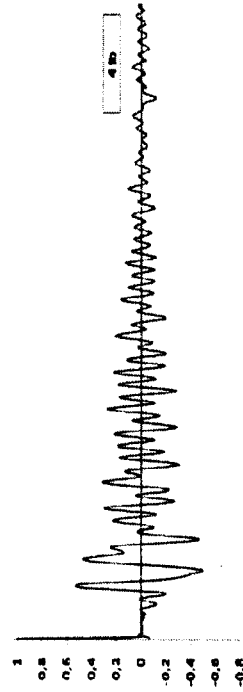
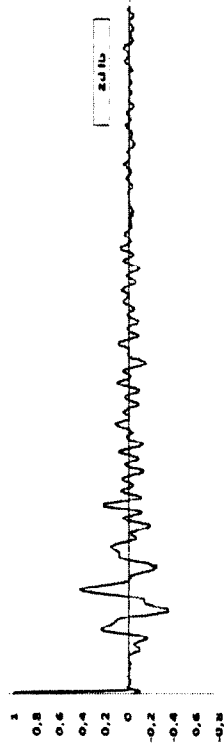
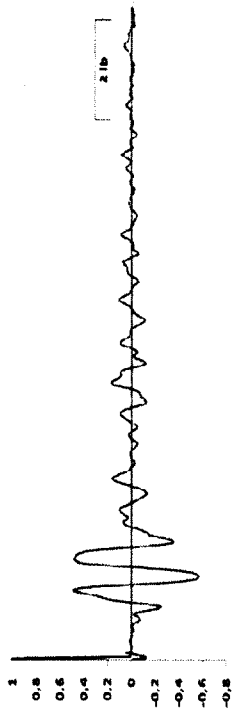
nt

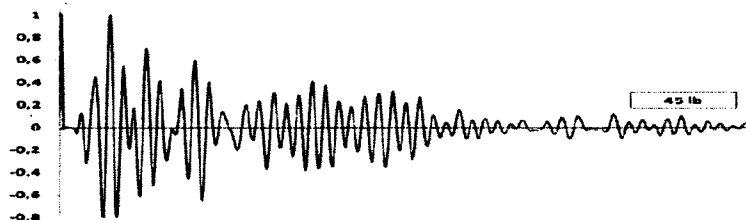
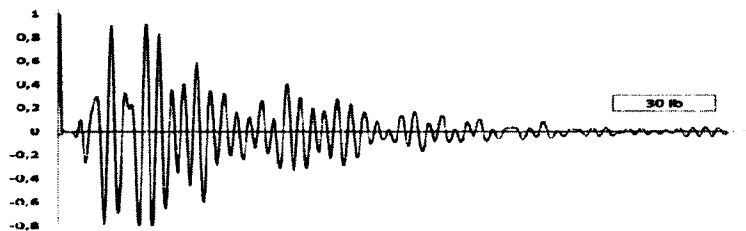
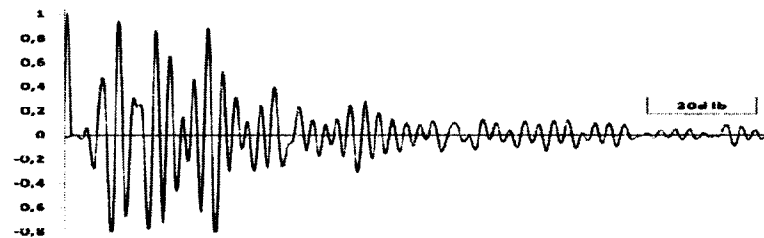
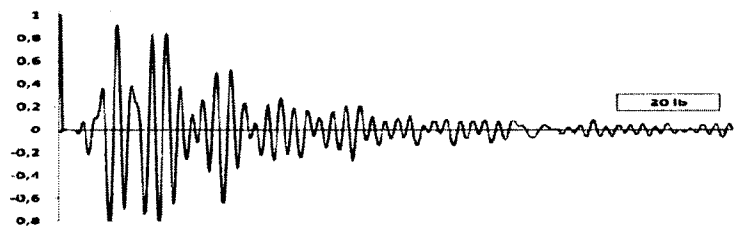
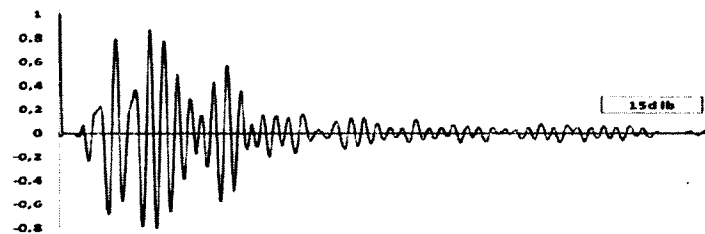
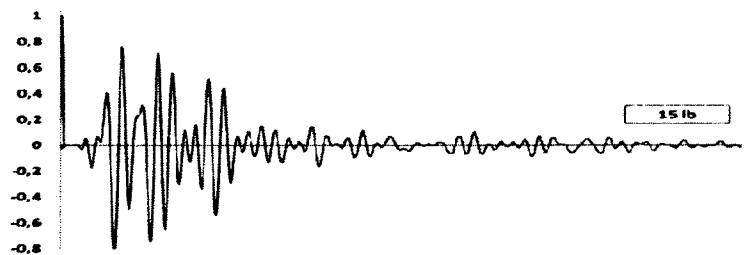


Déchargement

50 KHz

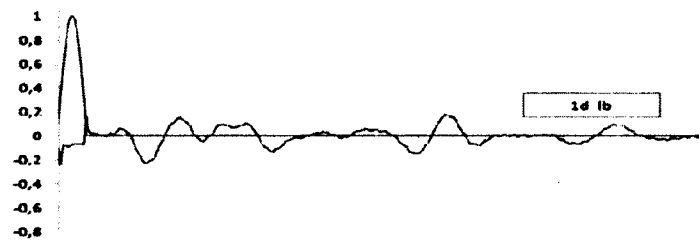
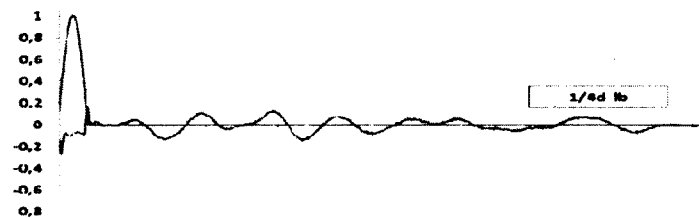
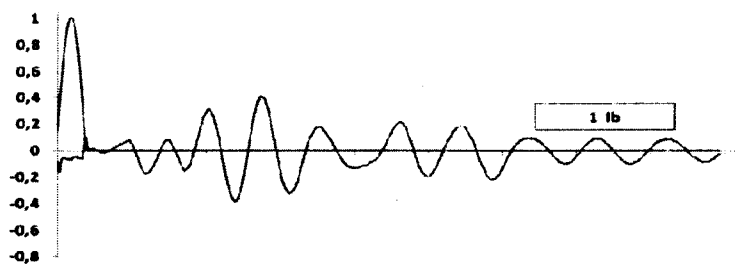
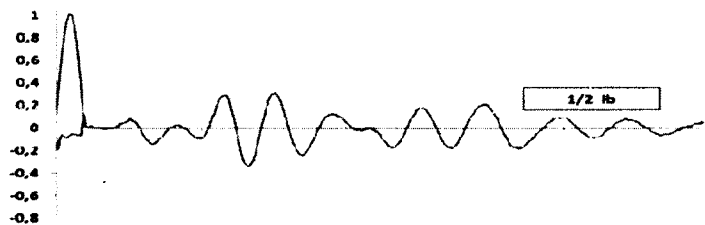
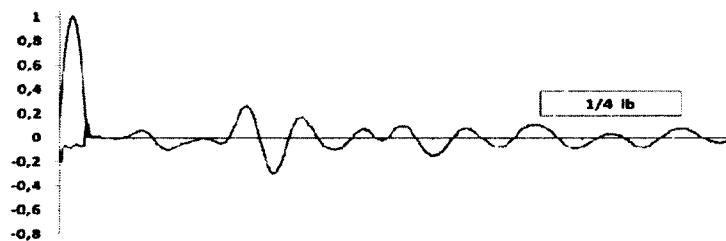
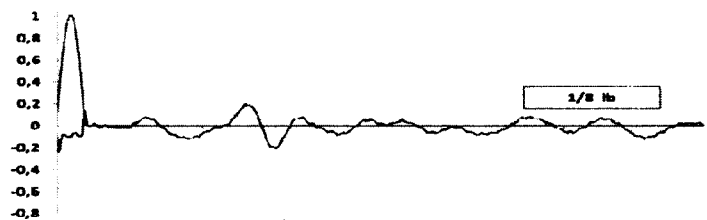


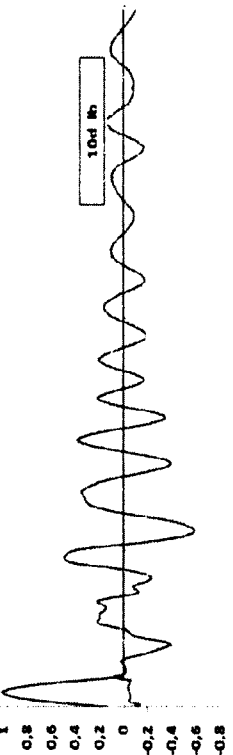
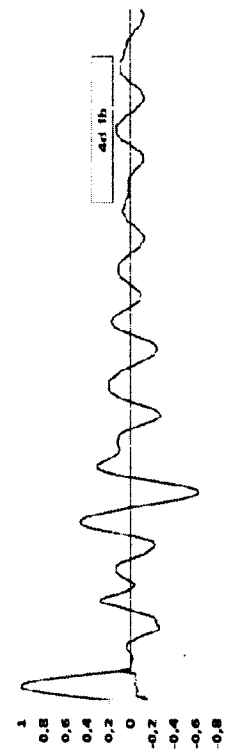
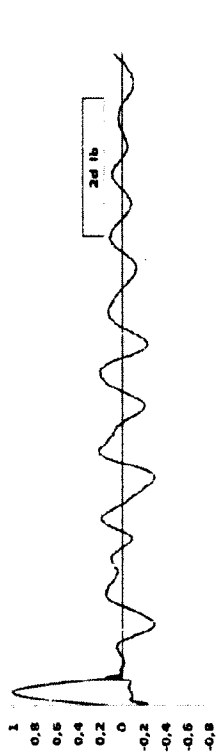
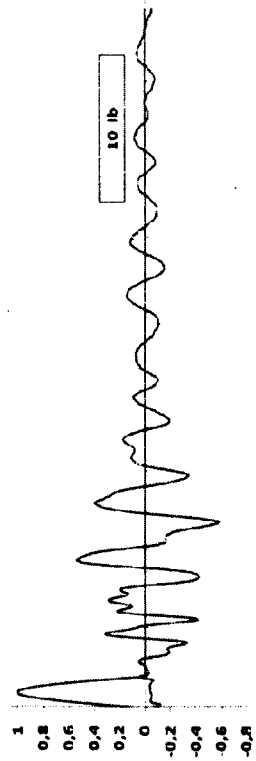
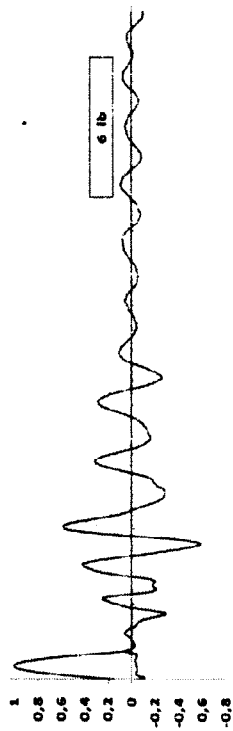
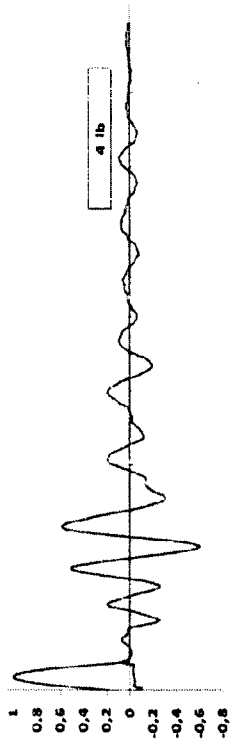
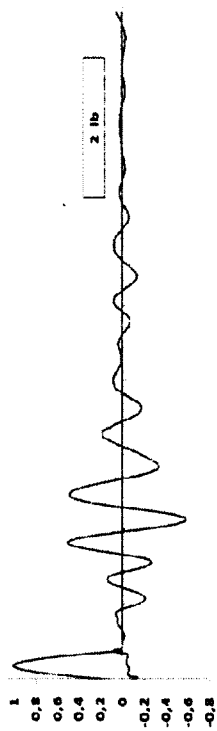


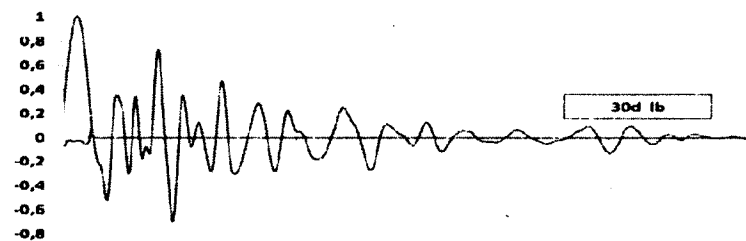
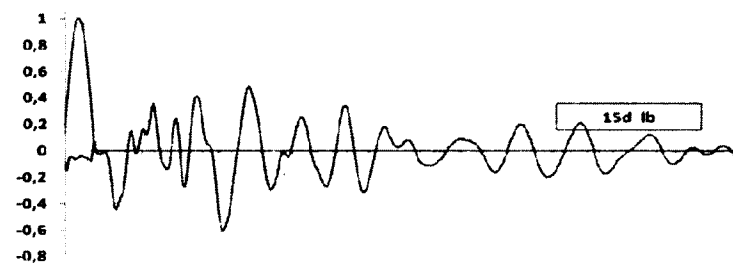
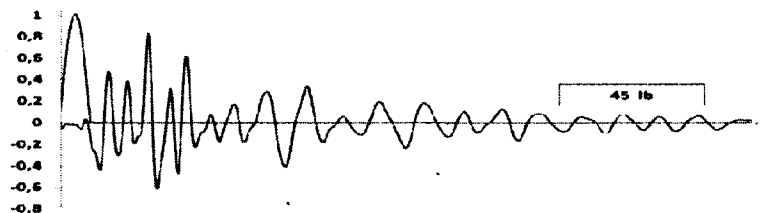
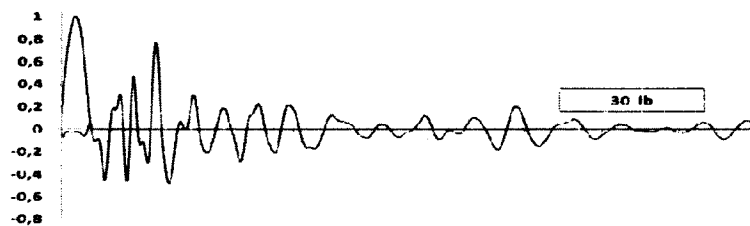
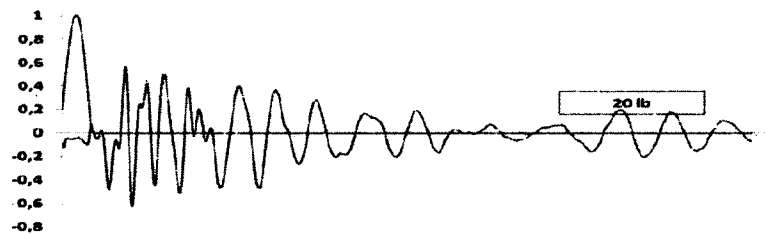
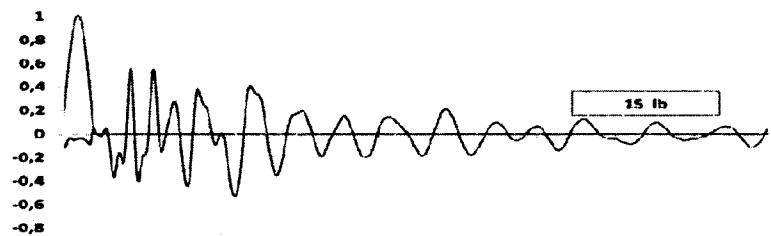


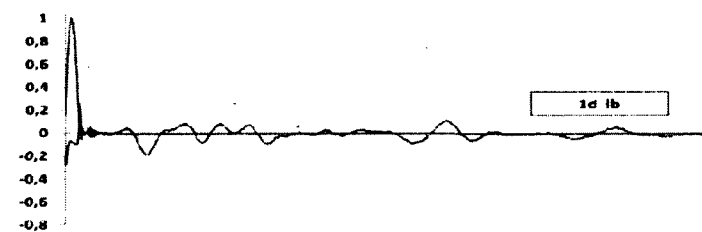
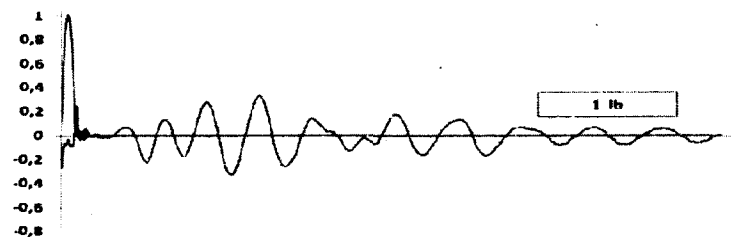
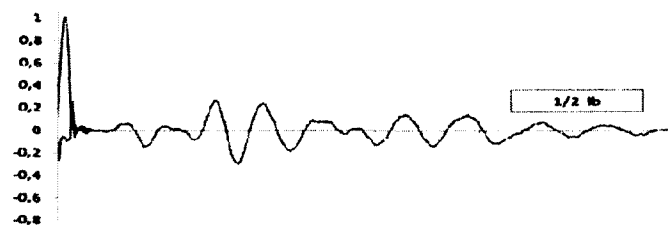
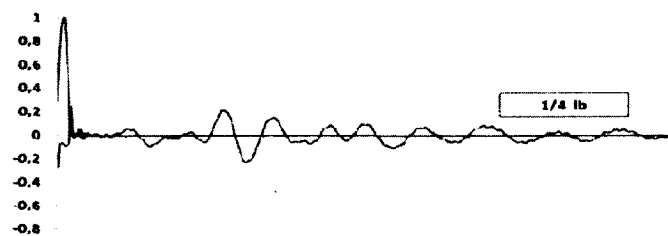
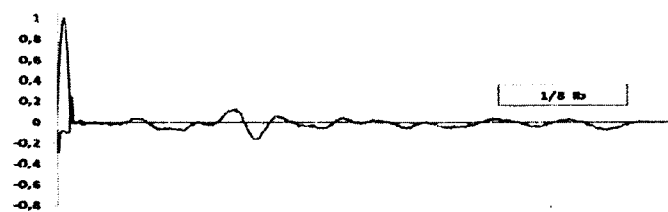
nent

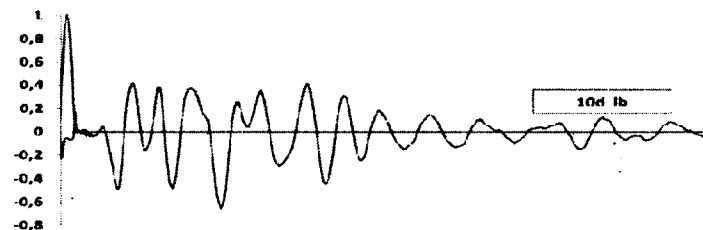
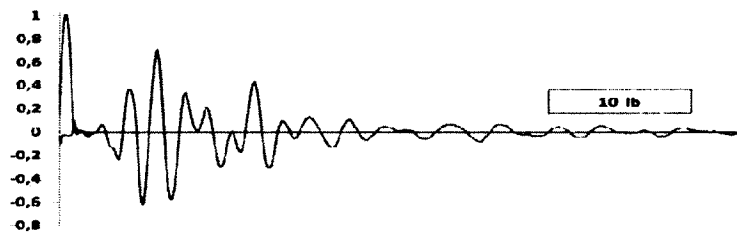
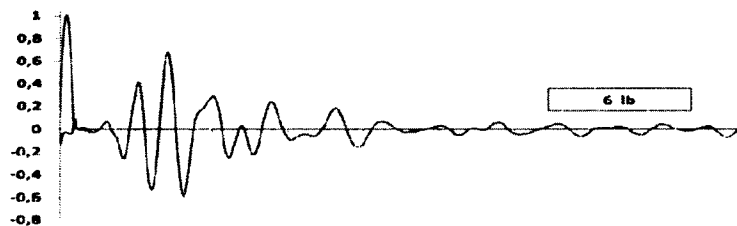
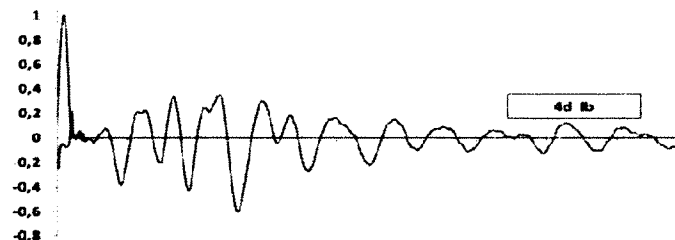
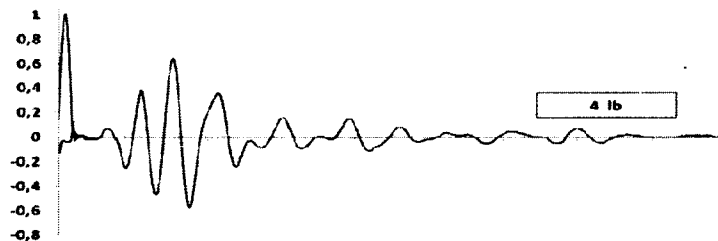
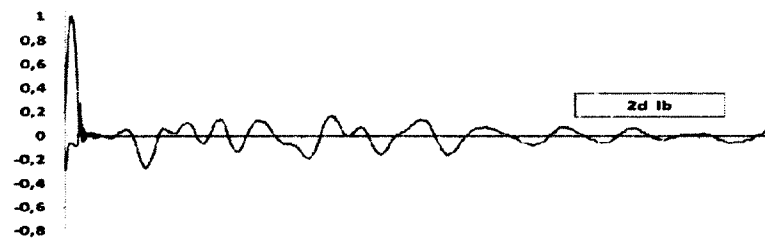
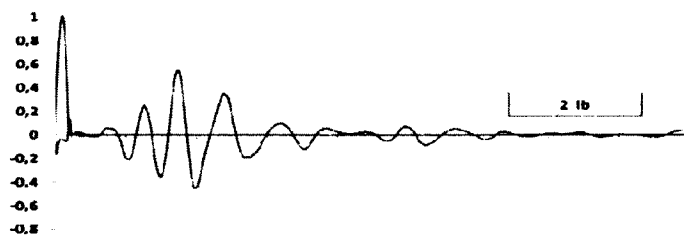
e. Déchargement
e 100 KHz

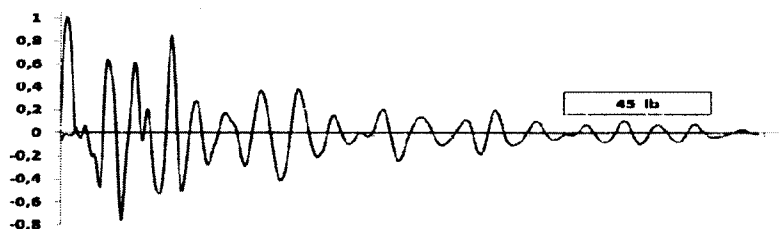
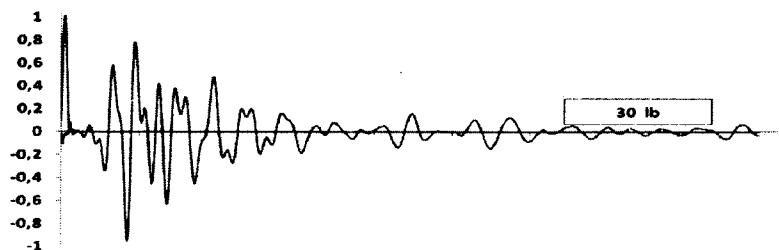
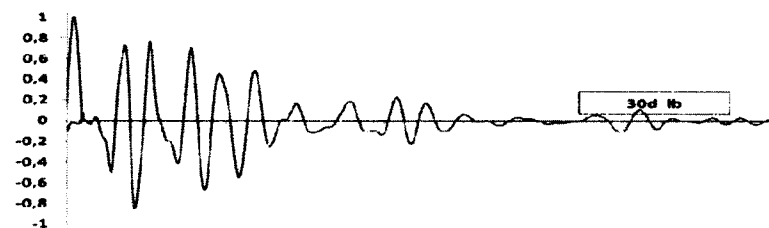
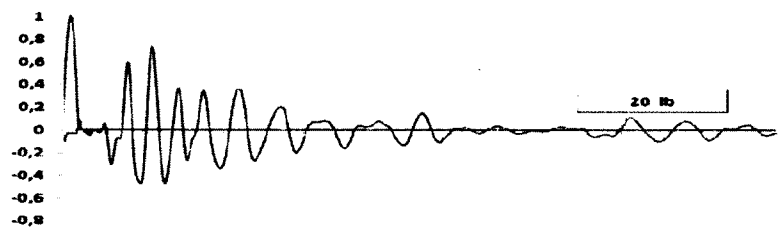
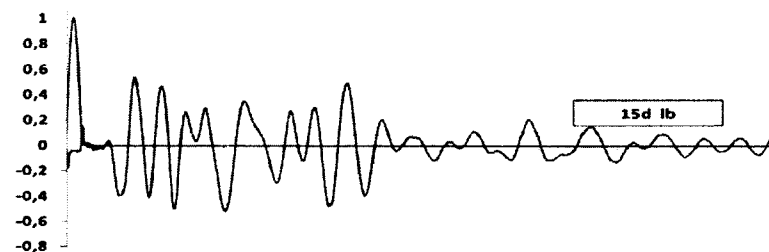
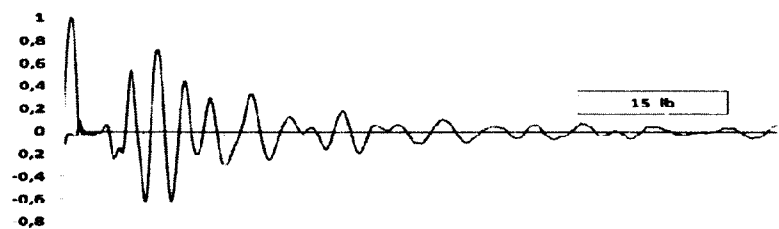






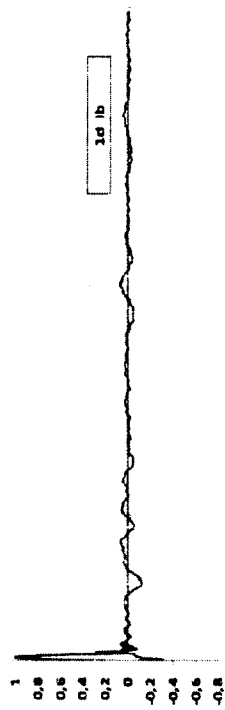
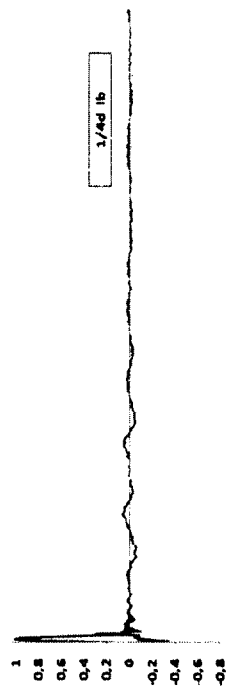
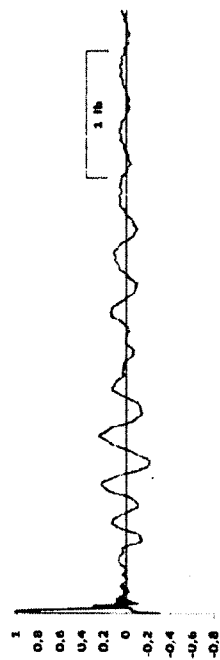
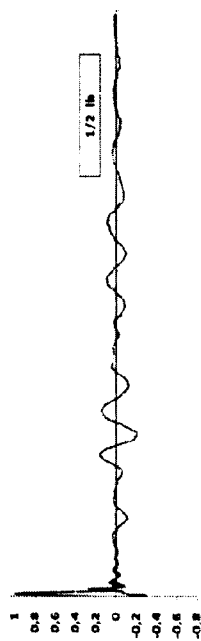
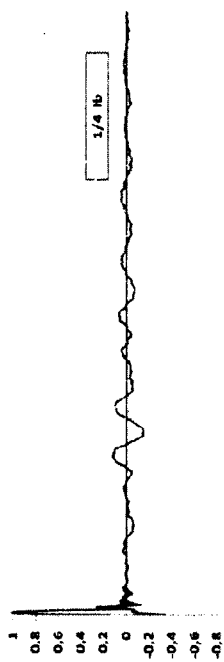
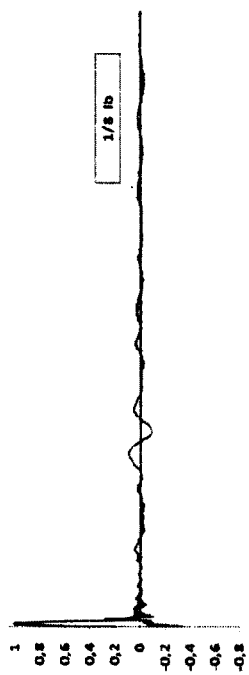


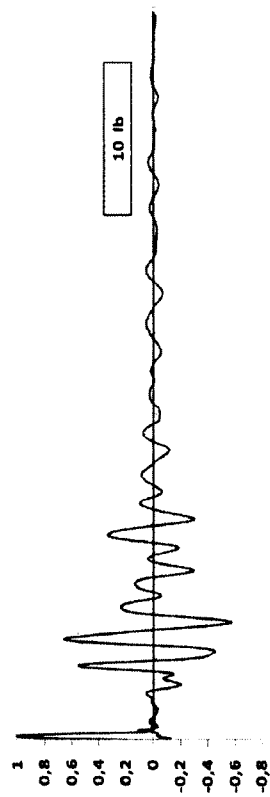
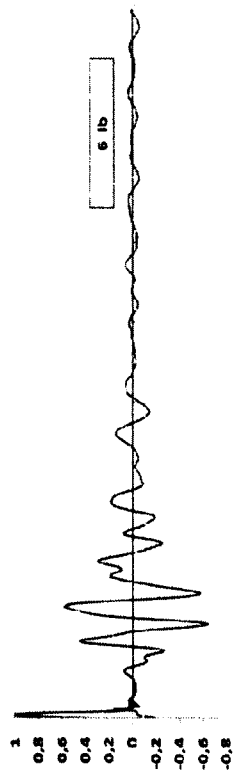
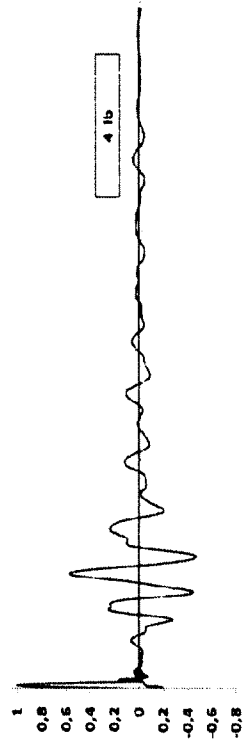
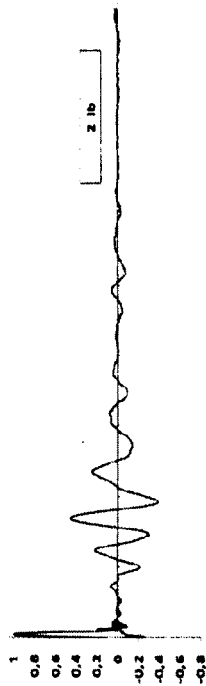
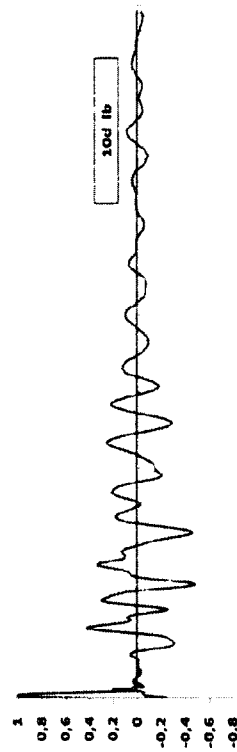
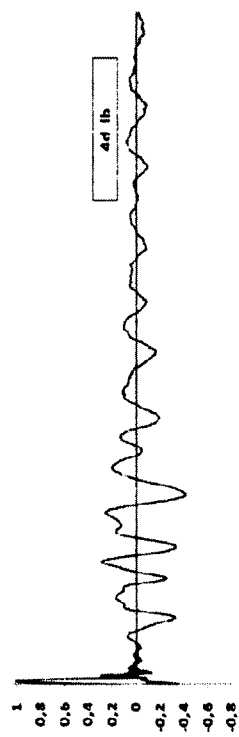
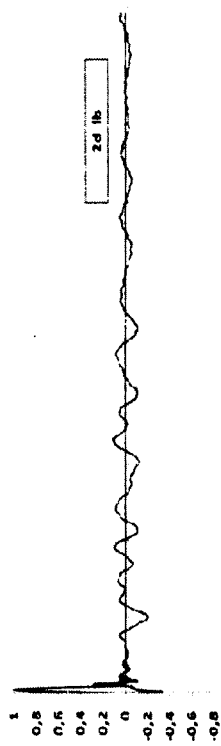


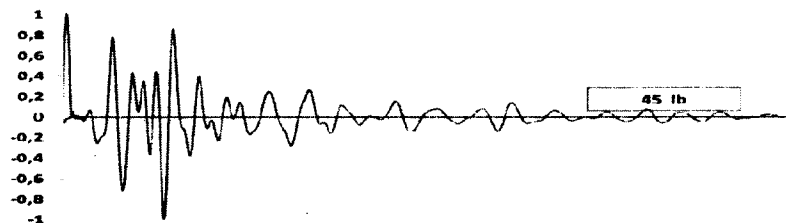
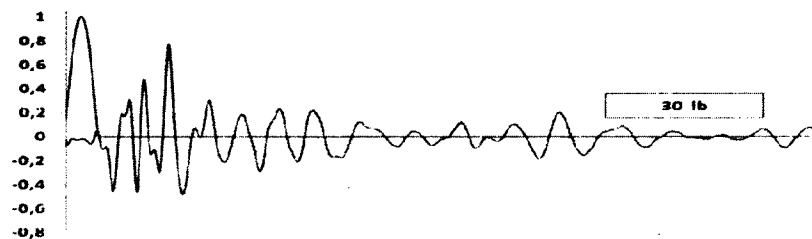
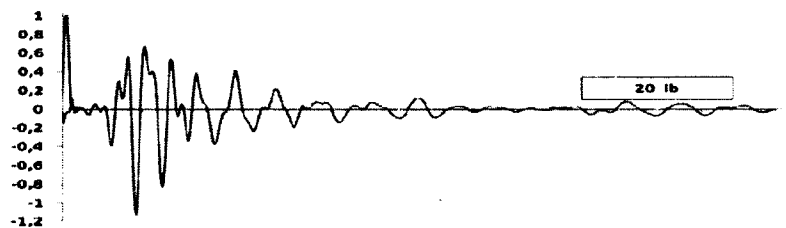
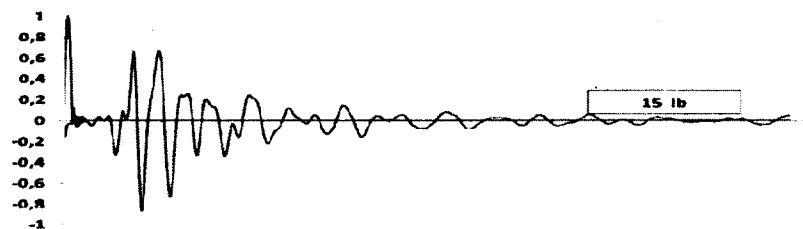


ent

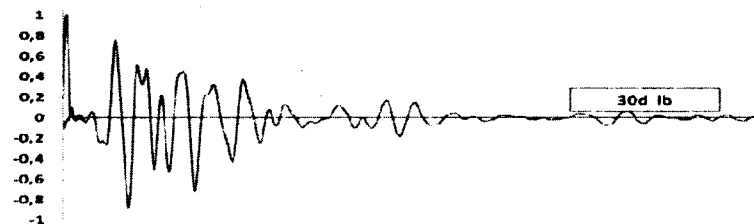
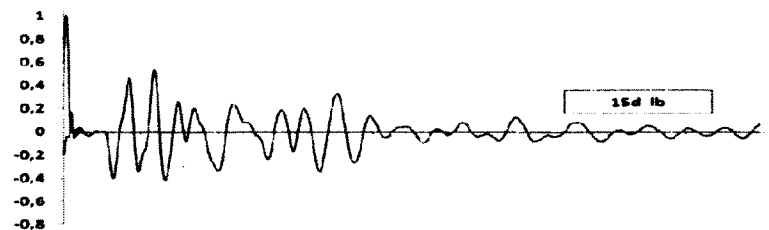
Déchargement
le 25 KHz



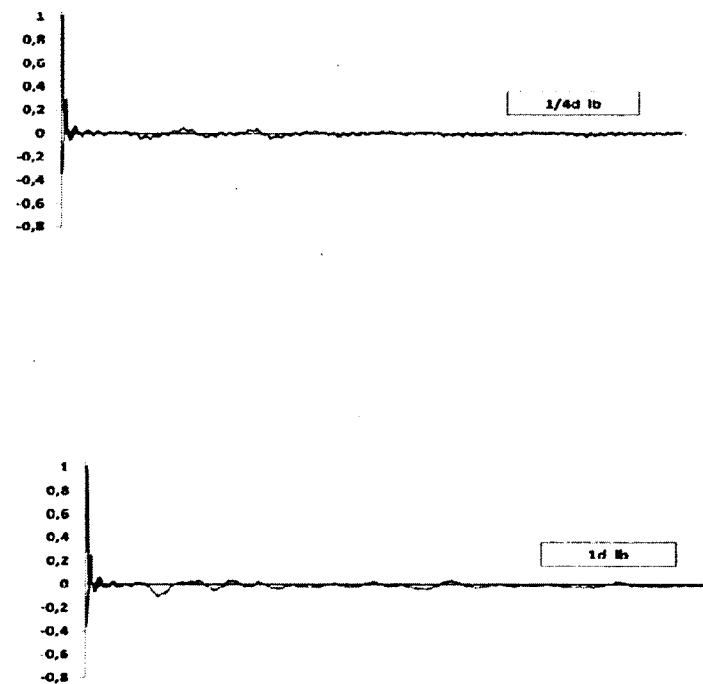
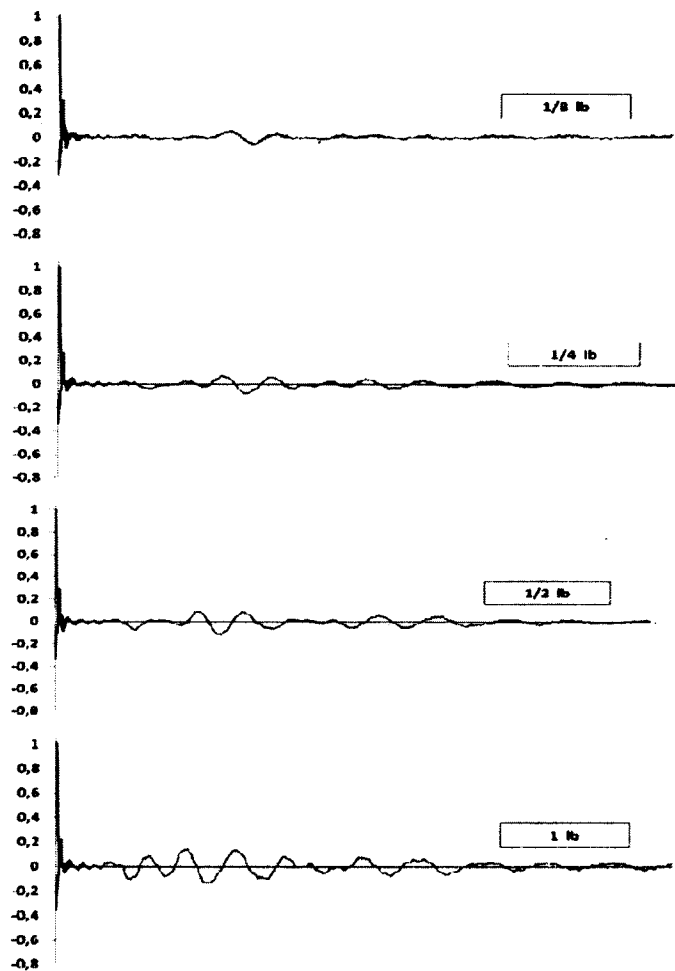


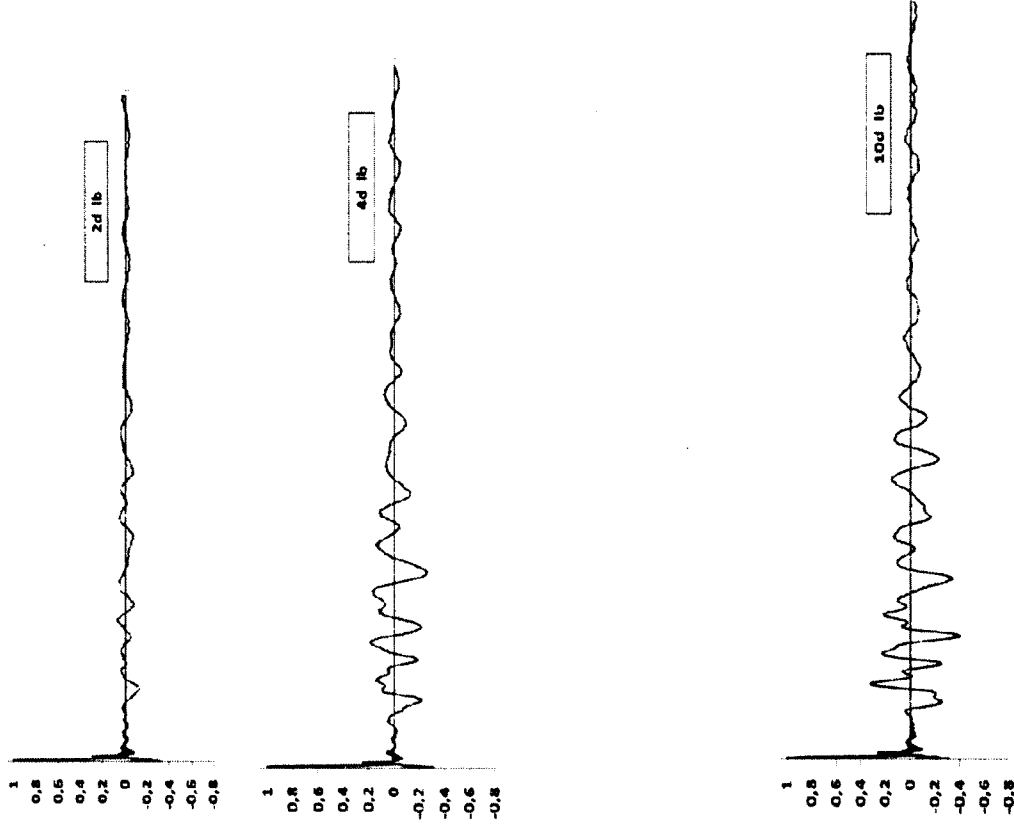
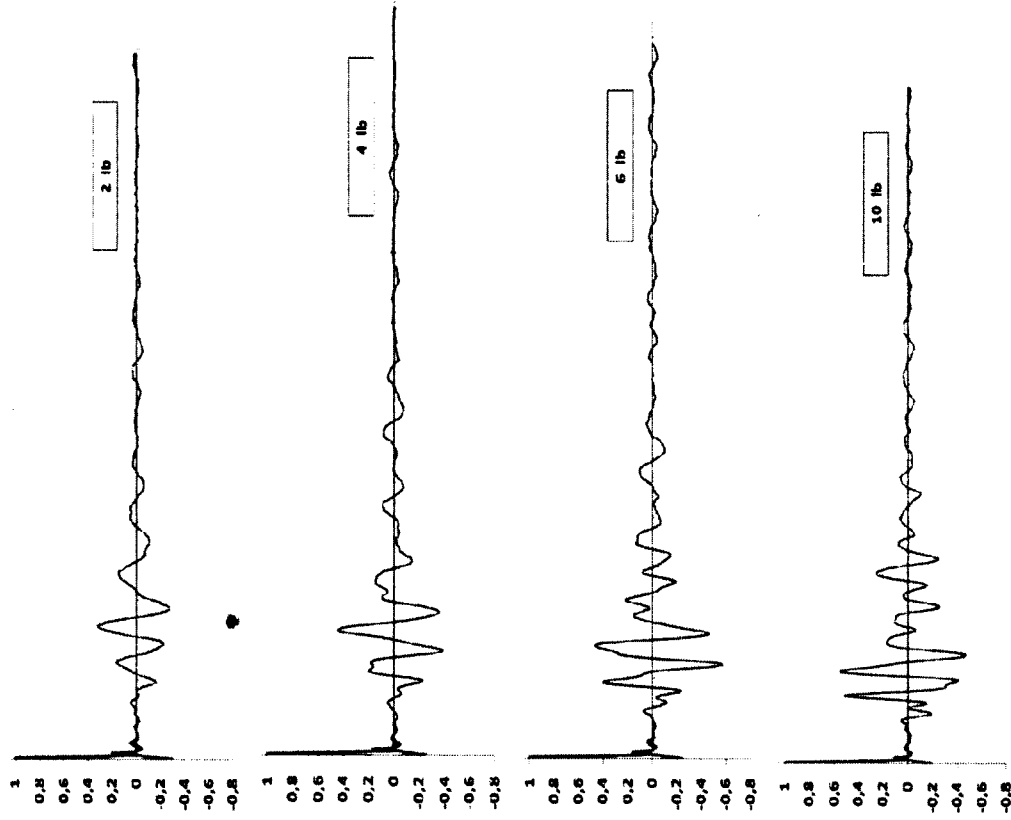


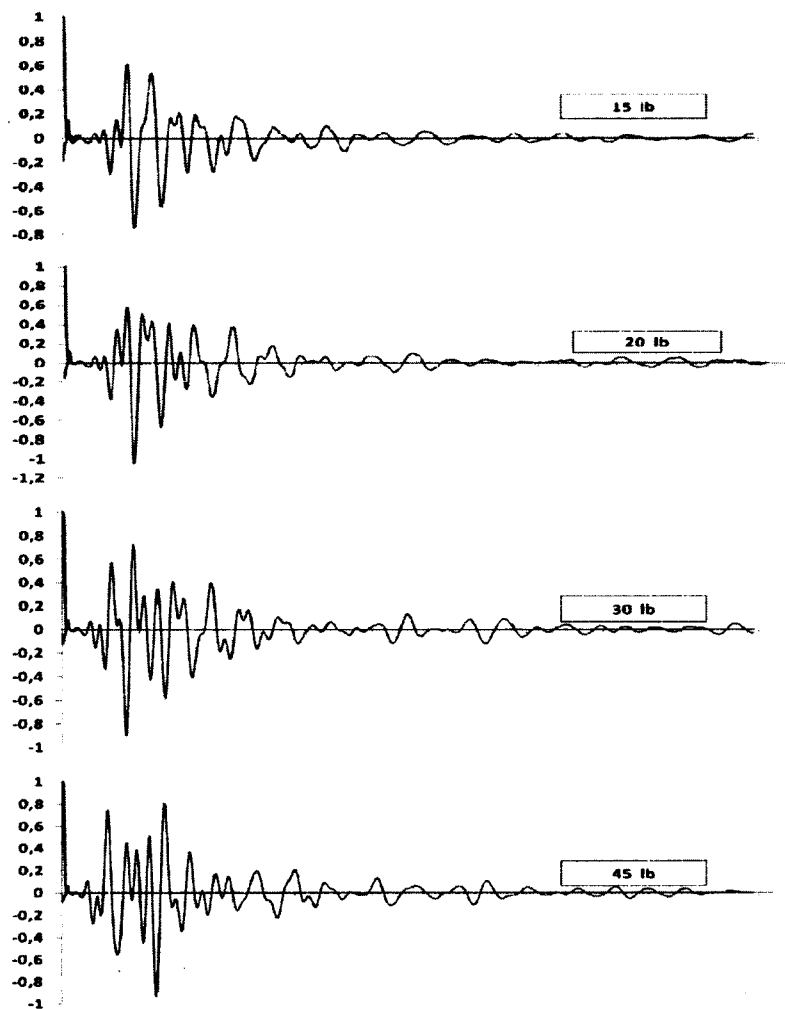
ment
z



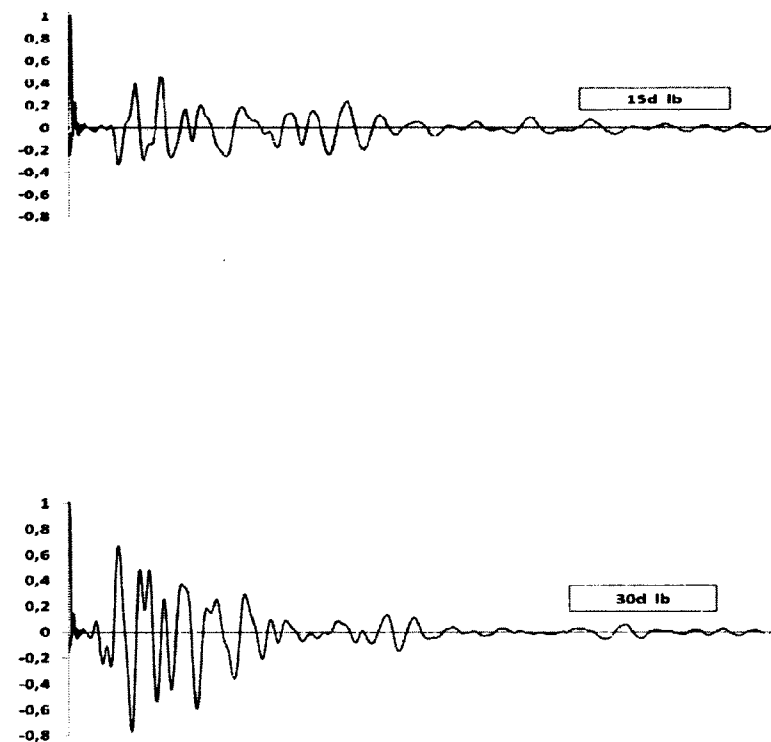
e). Déchargement
n de 50 KHz



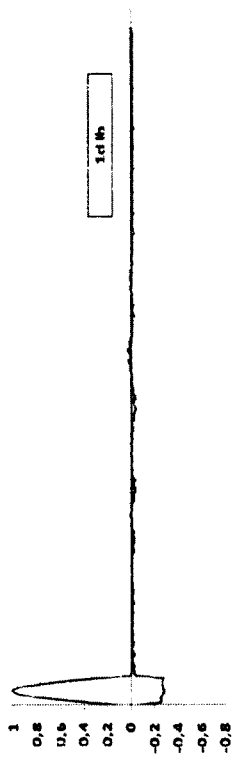
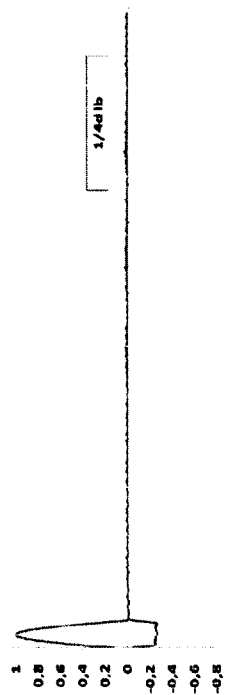
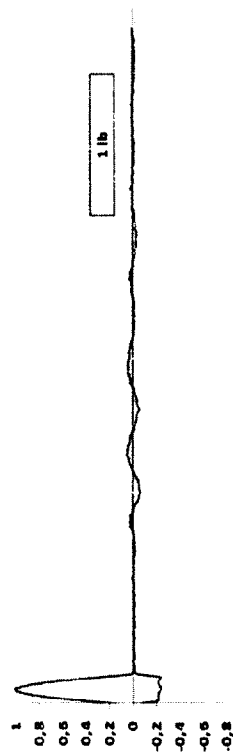
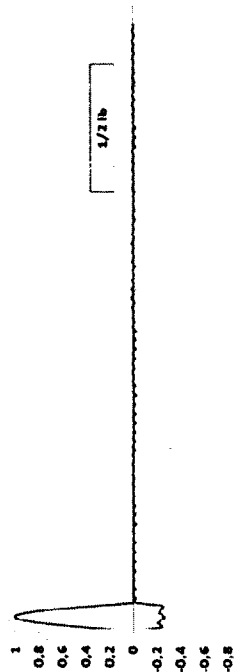
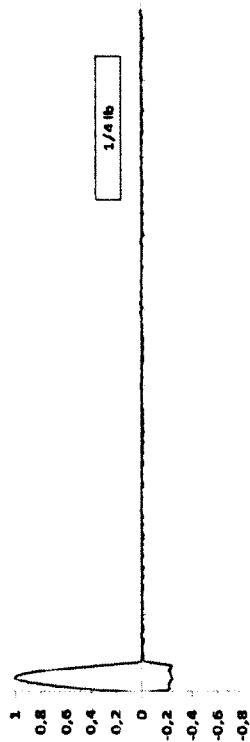
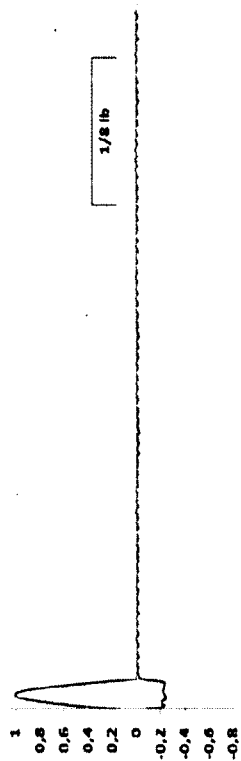


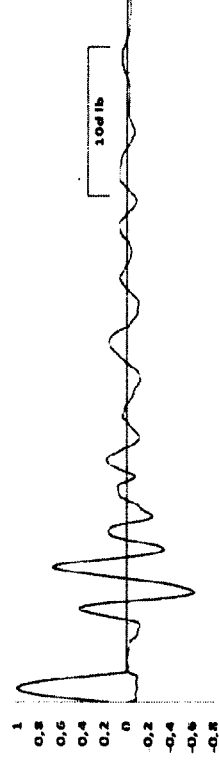
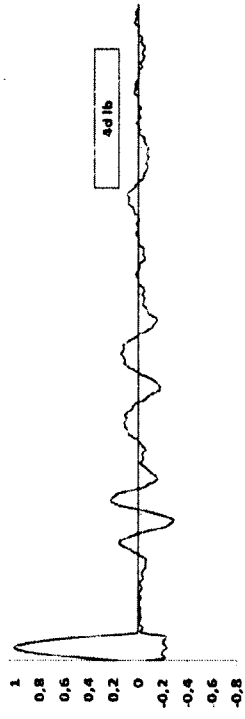
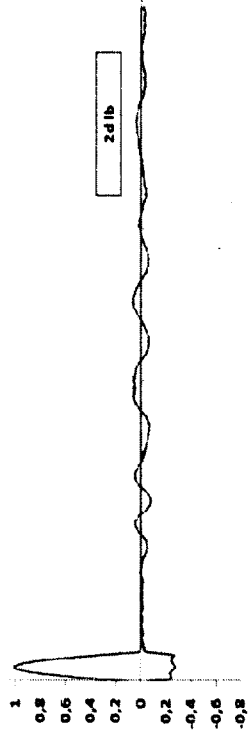
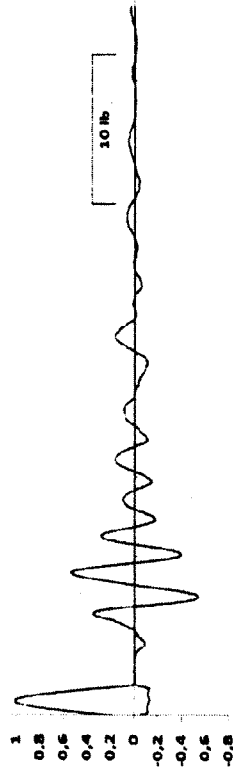
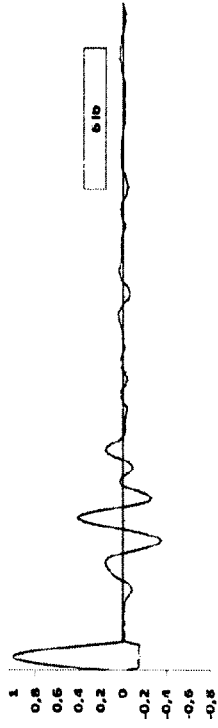
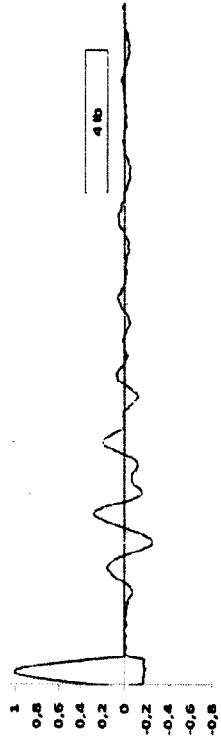
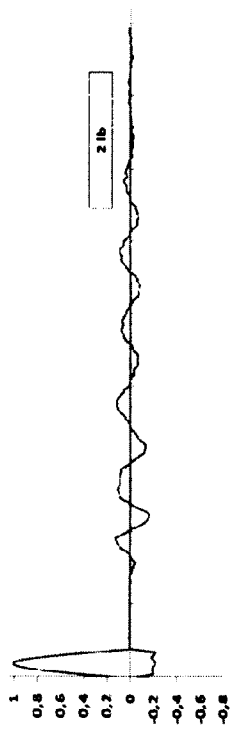


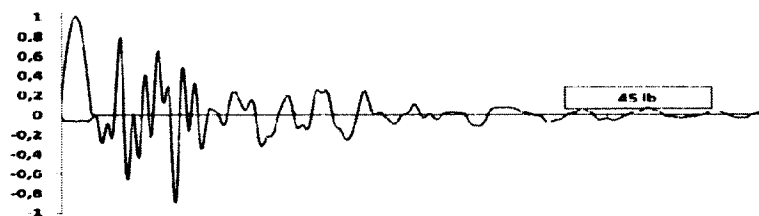
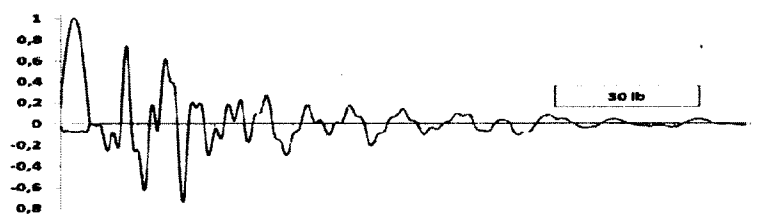
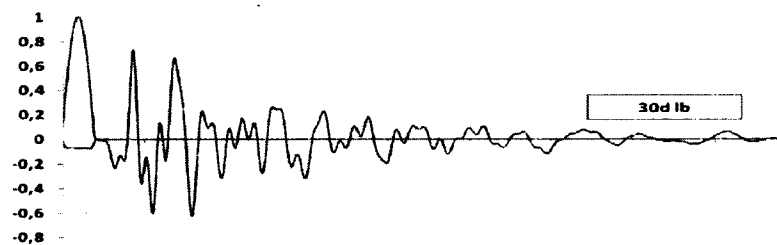
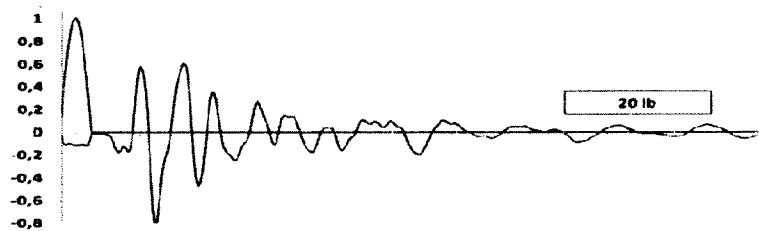
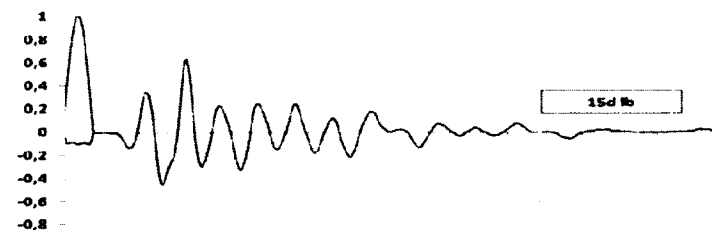
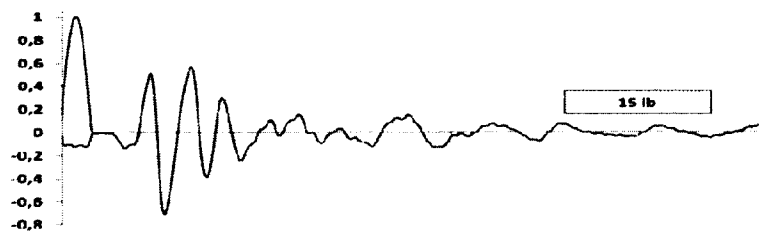
t



déchargement
100 KHz

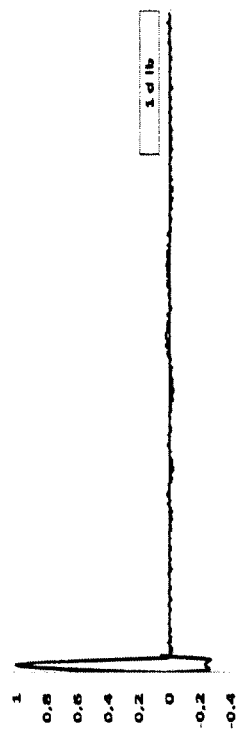
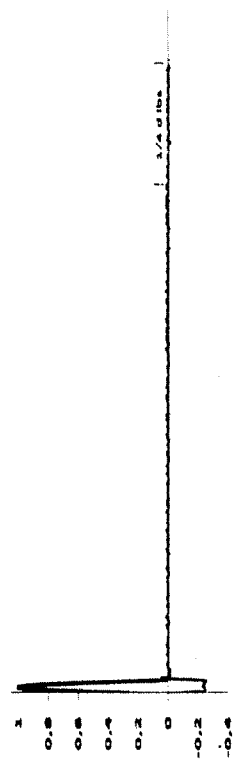
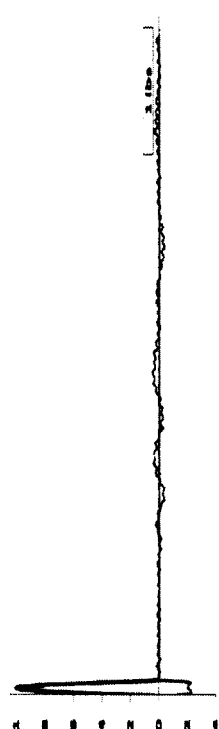
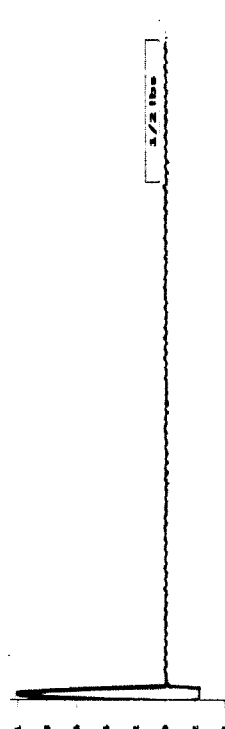
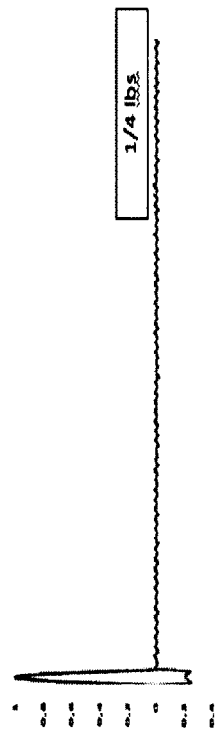
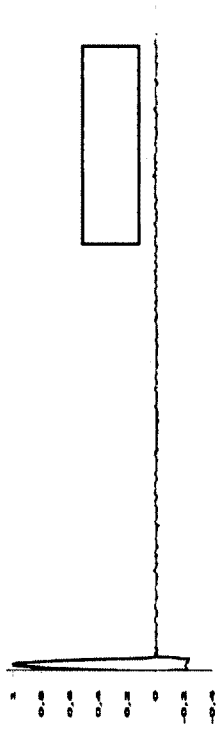


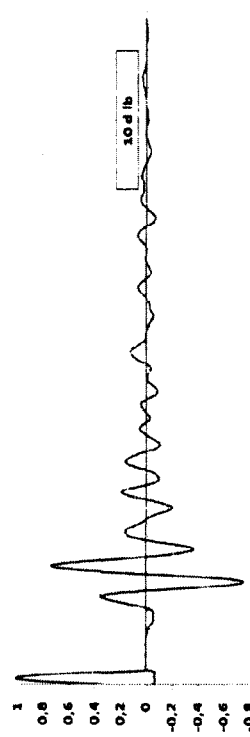
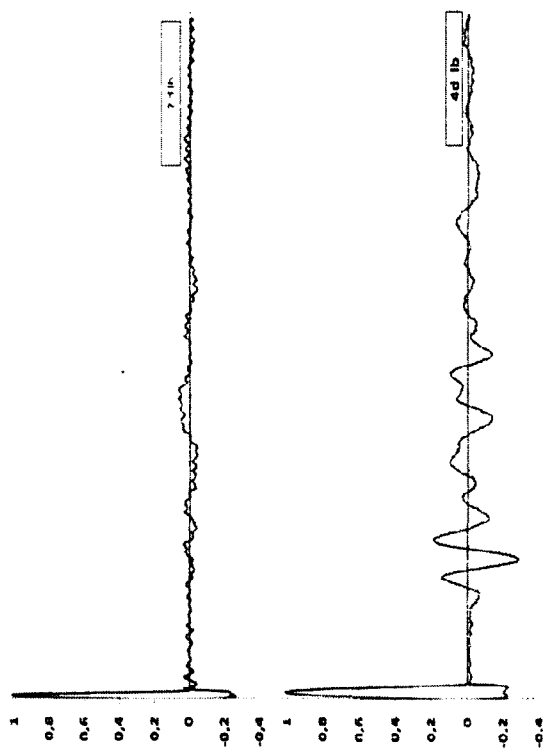
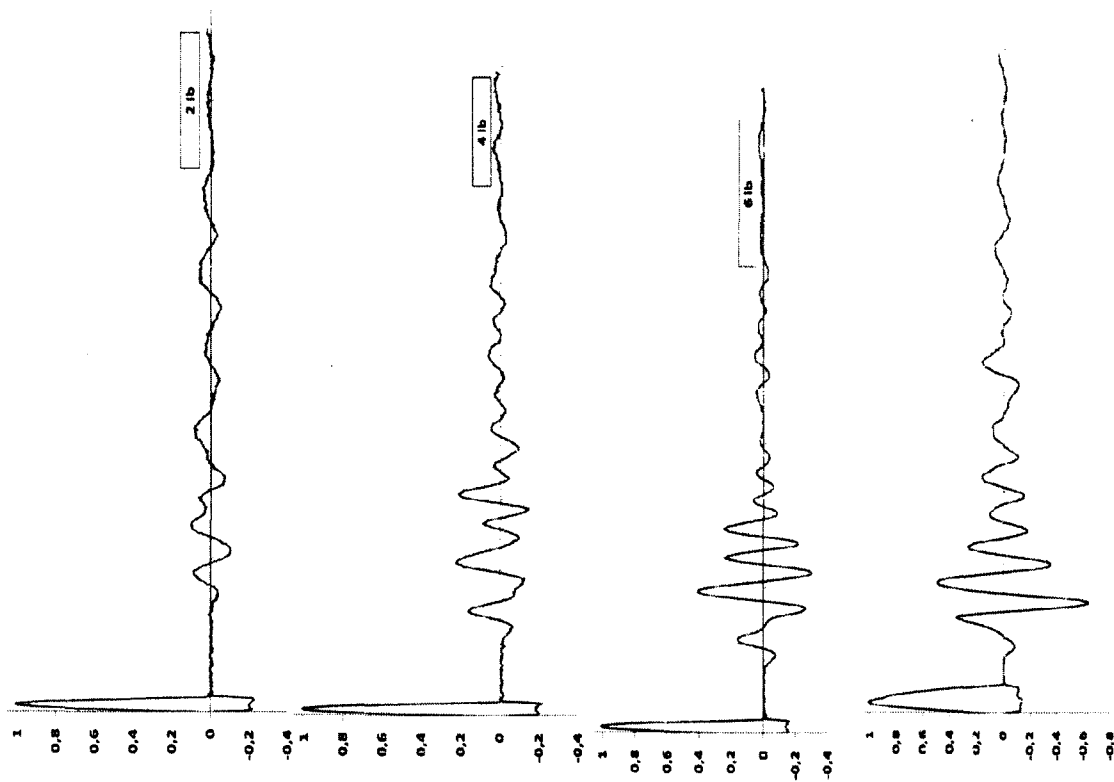


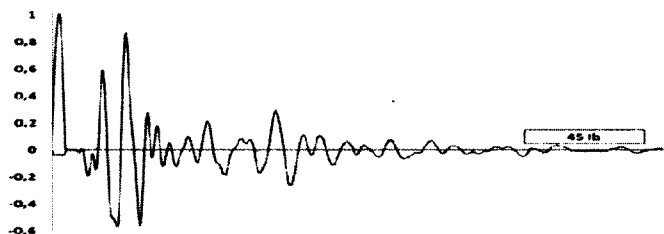
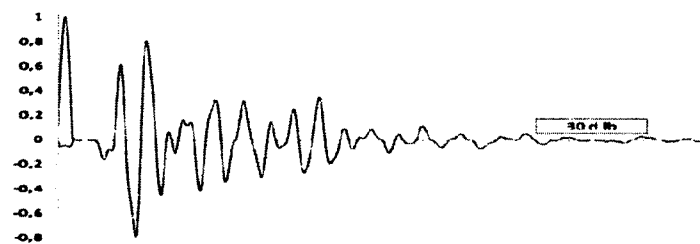
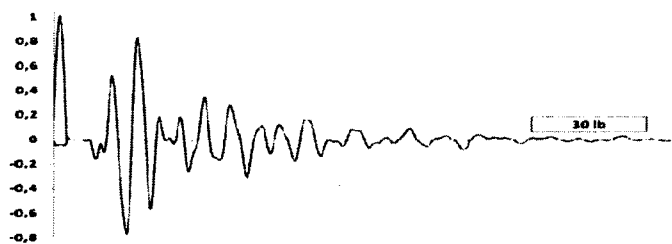
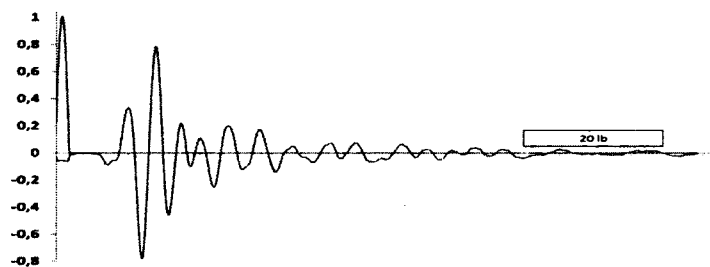
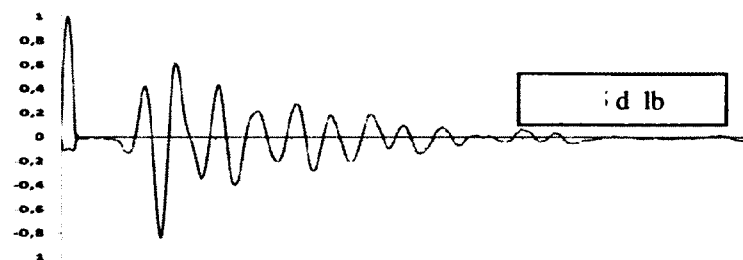
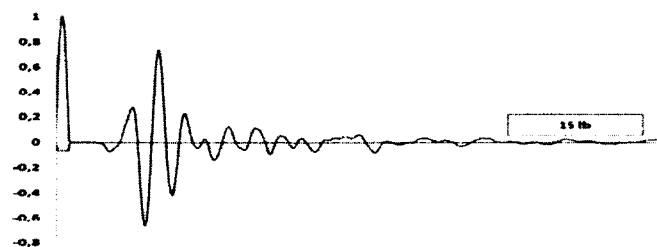


nt
z

chargement
12,5 khz

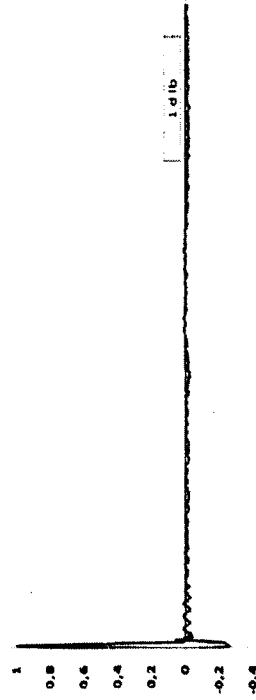
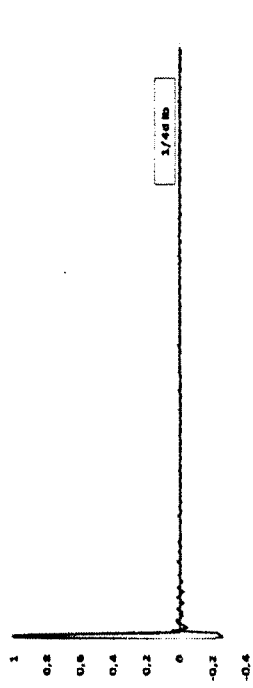
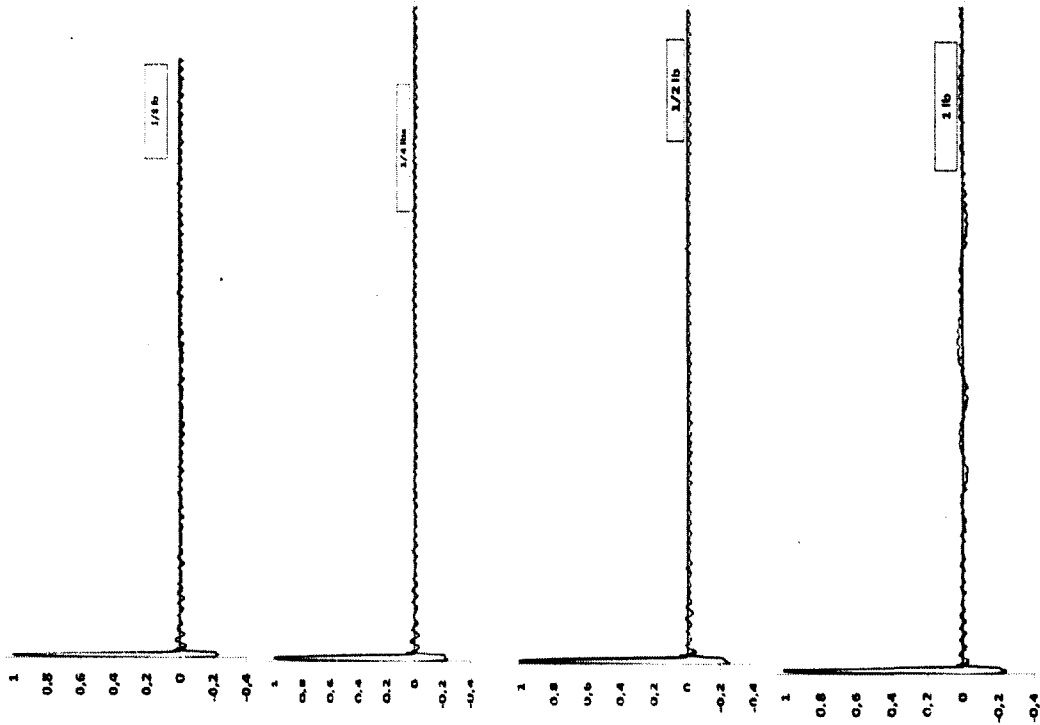


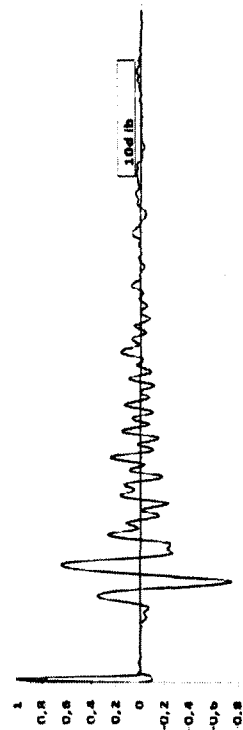
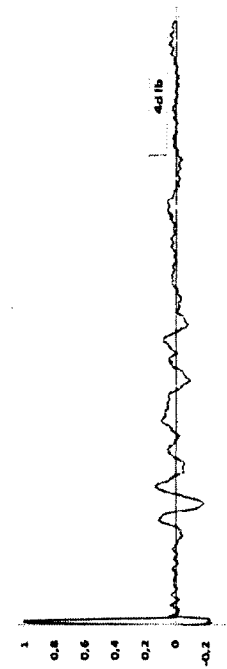
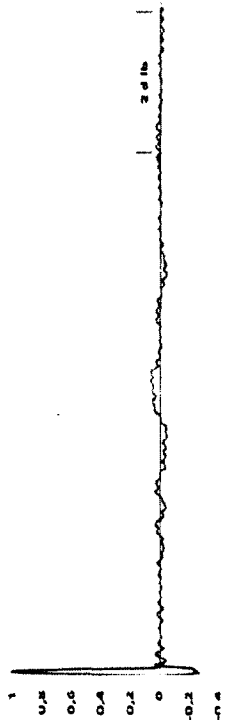
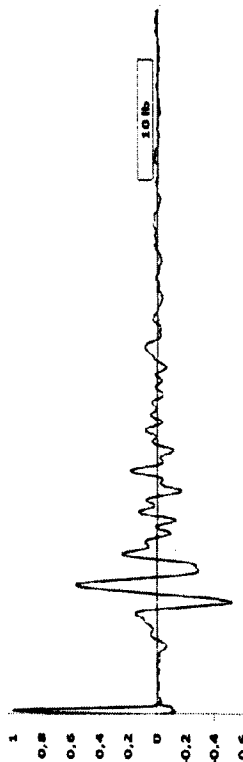
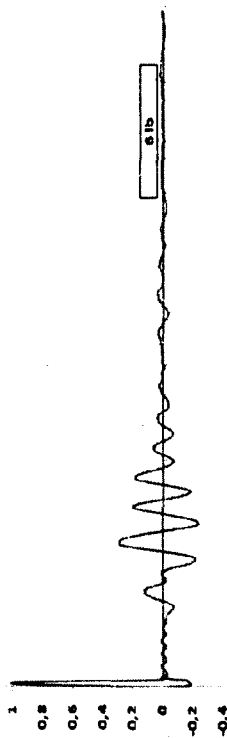
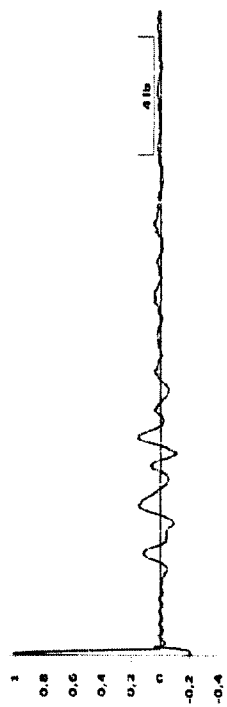
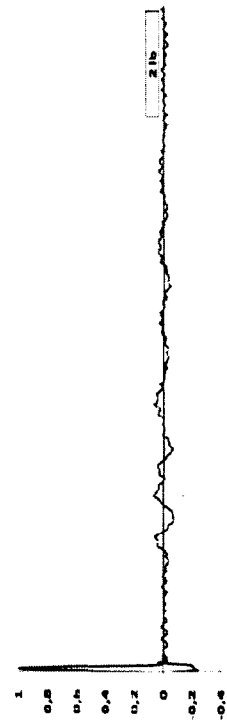


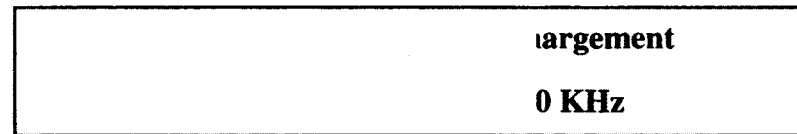
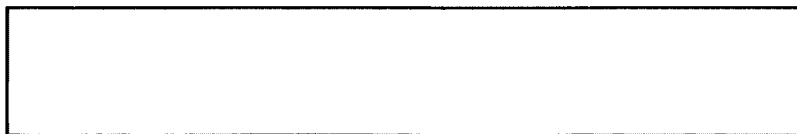
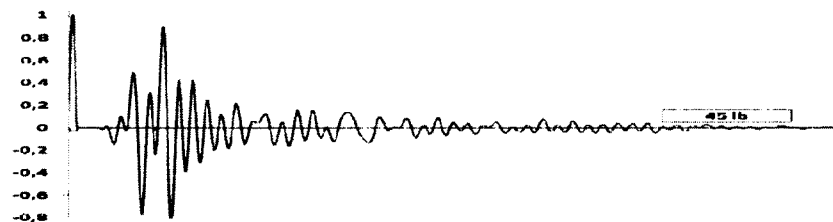
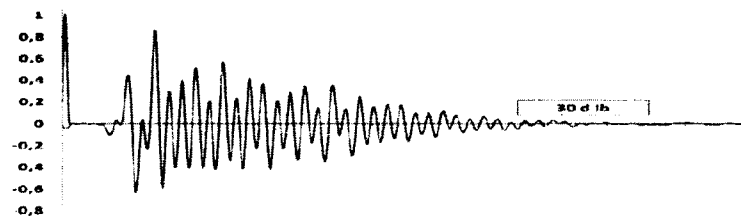
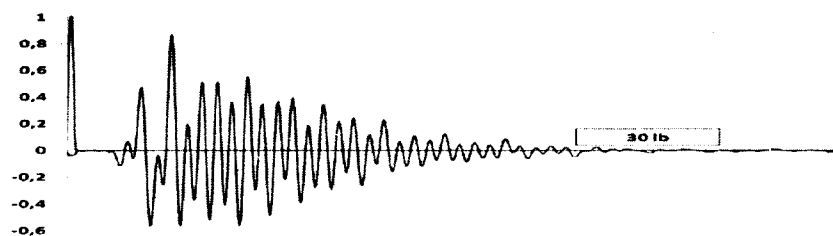
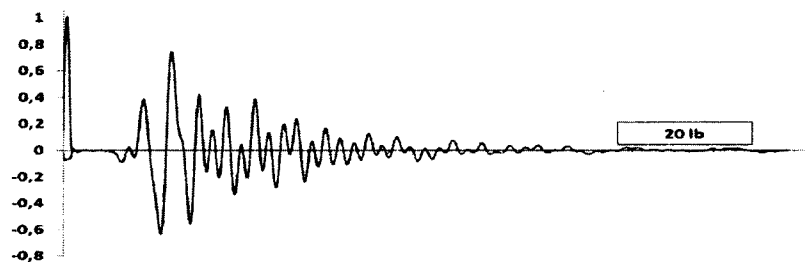
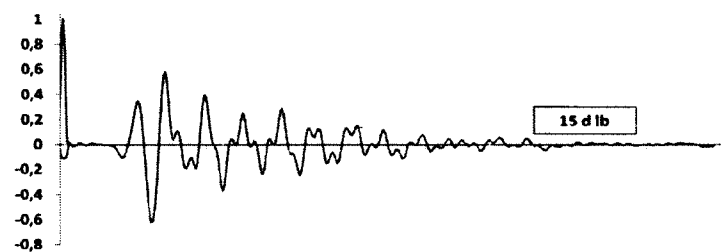
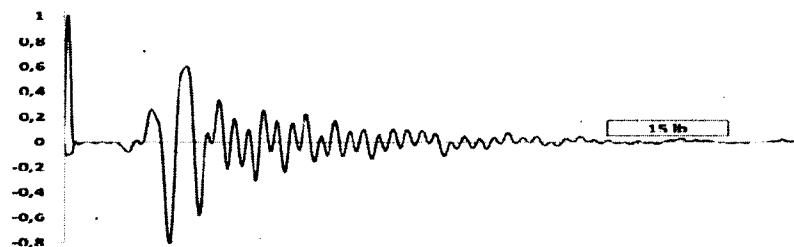


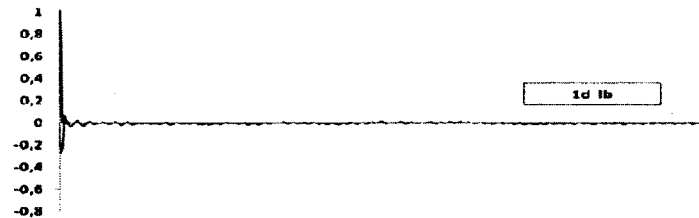
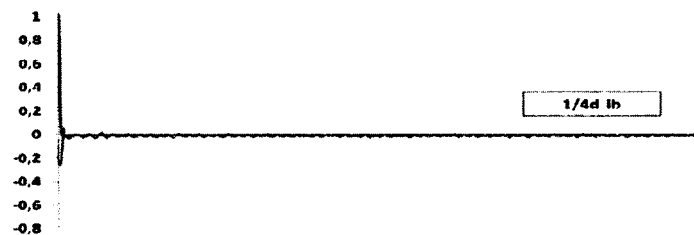
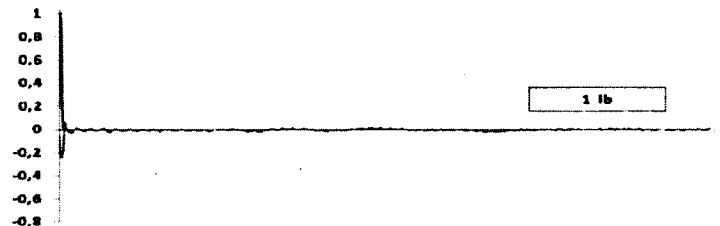
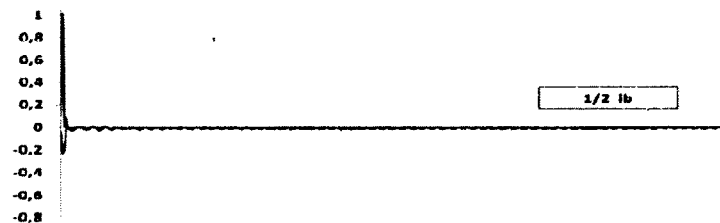
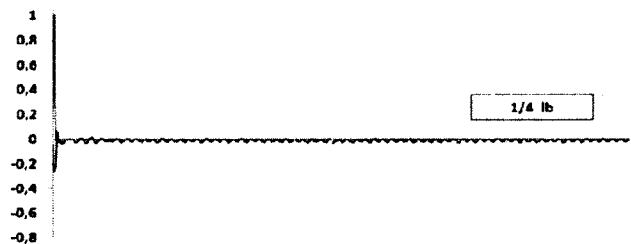
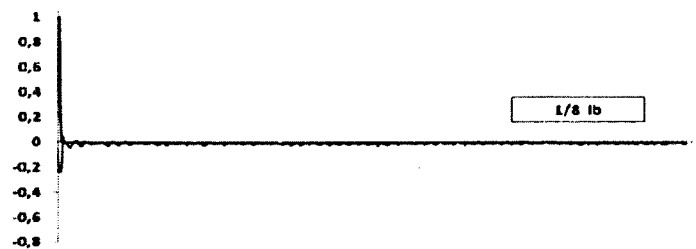
ment
Hz

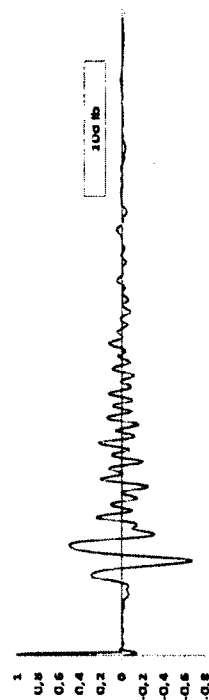
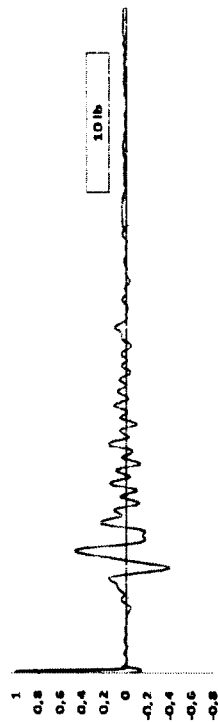
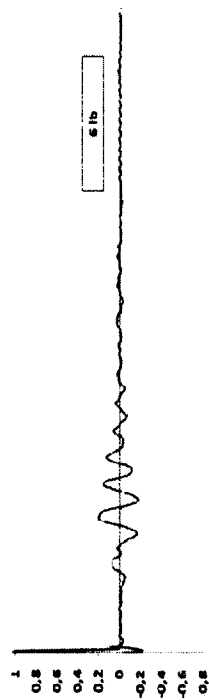
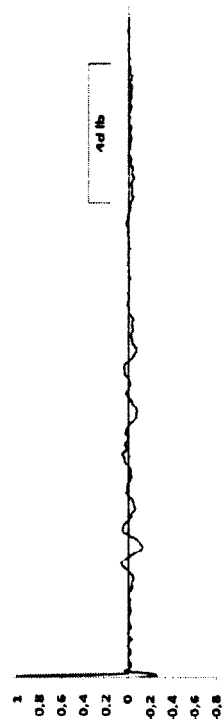
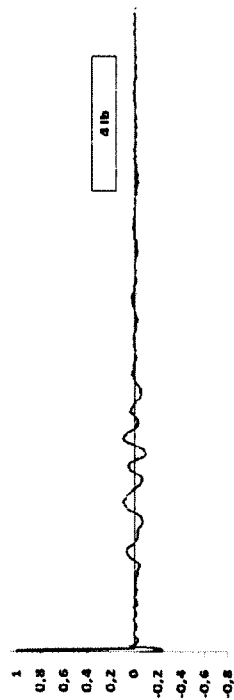
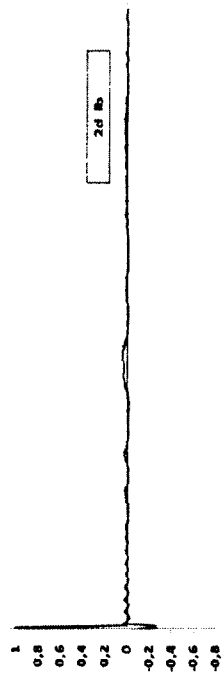
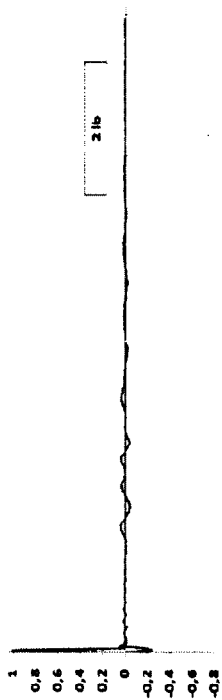
gement
khz

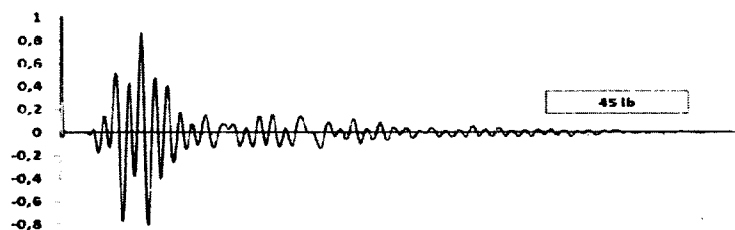
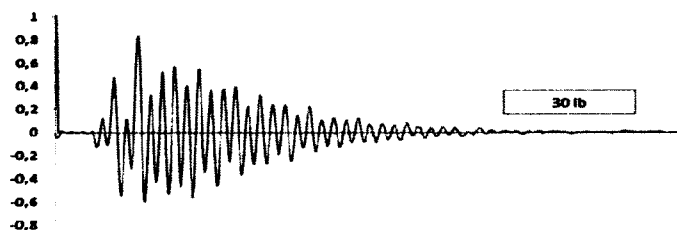
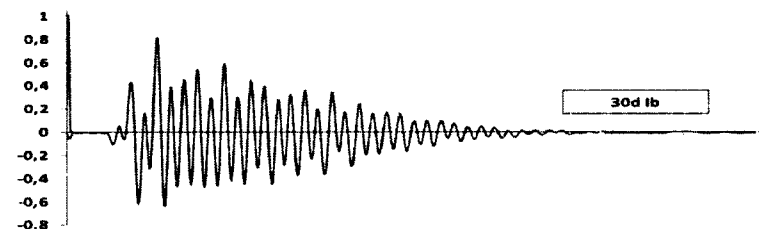
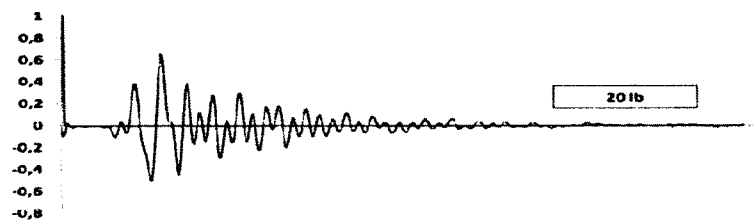
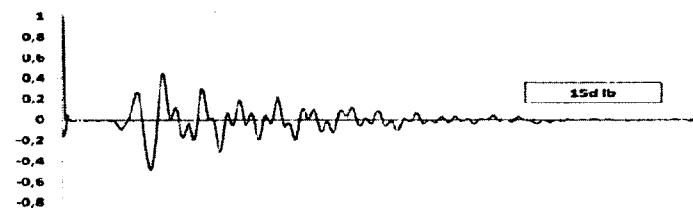
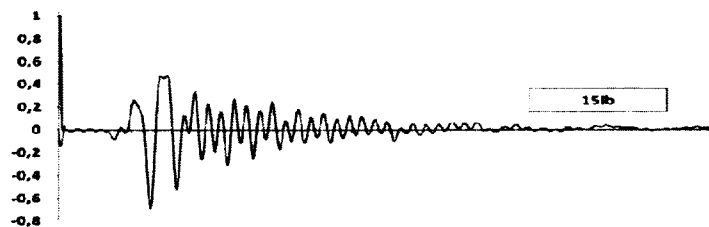






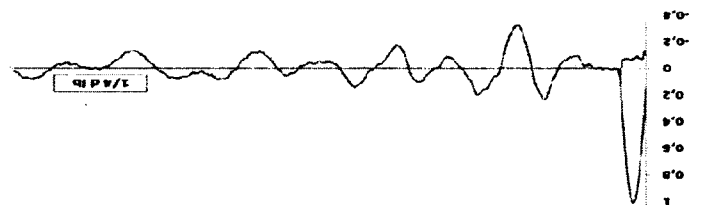
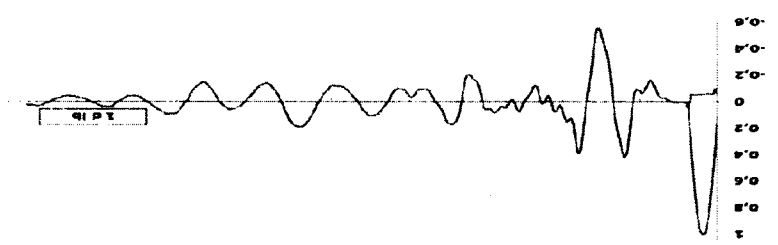
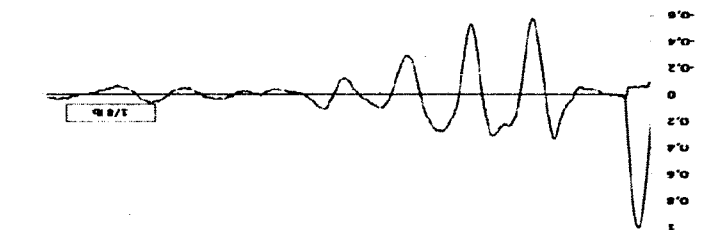
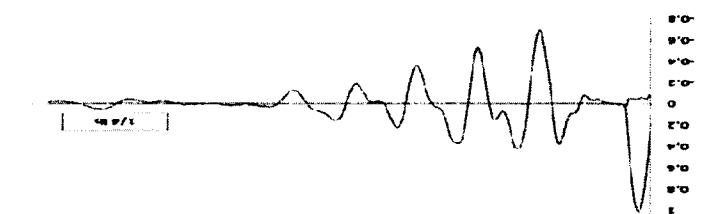
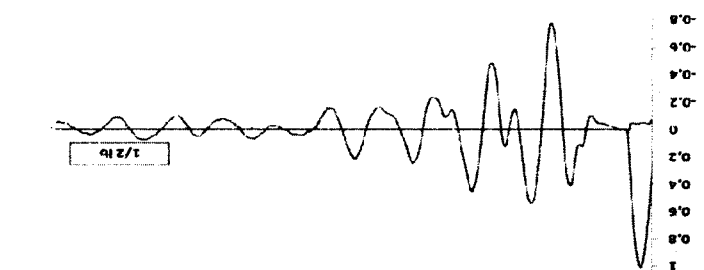
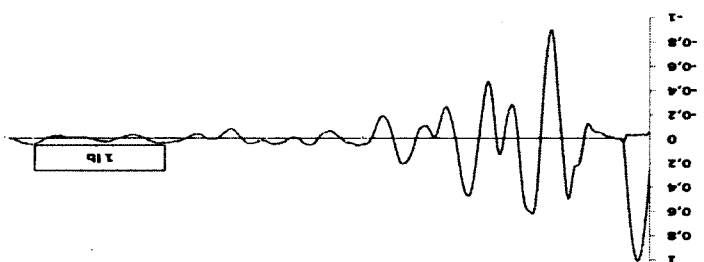


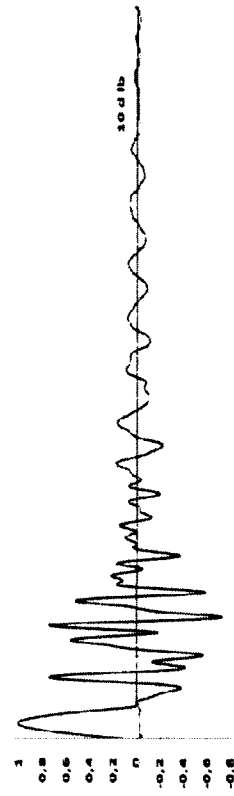
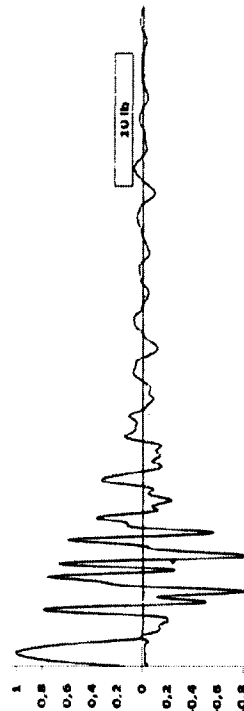
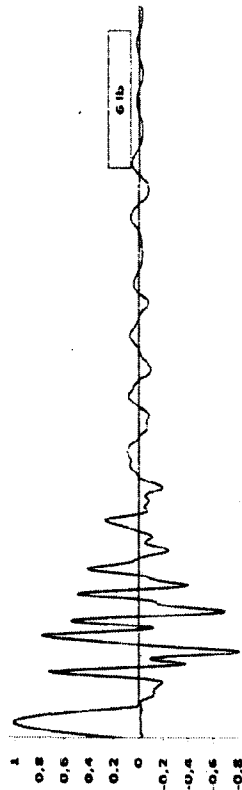
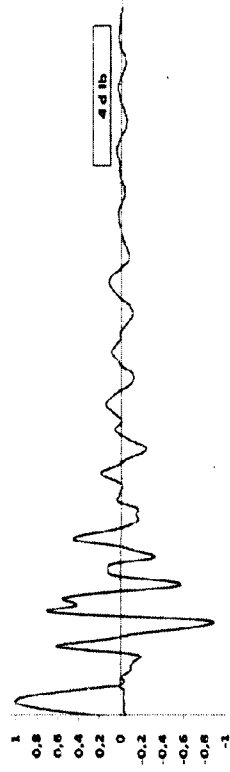
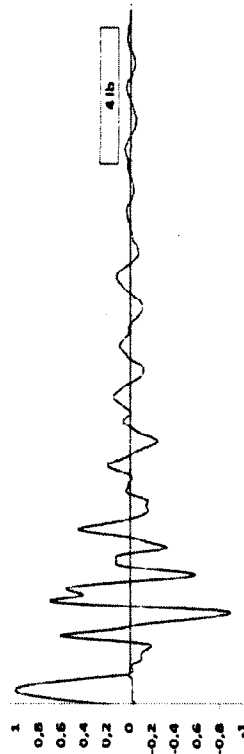
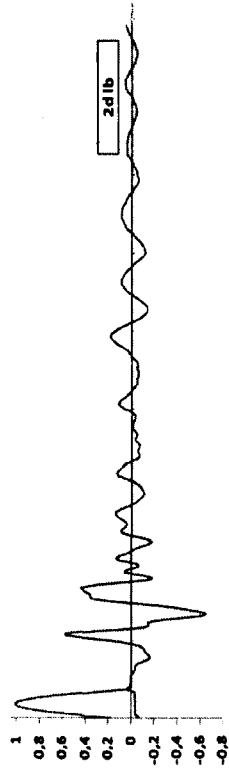
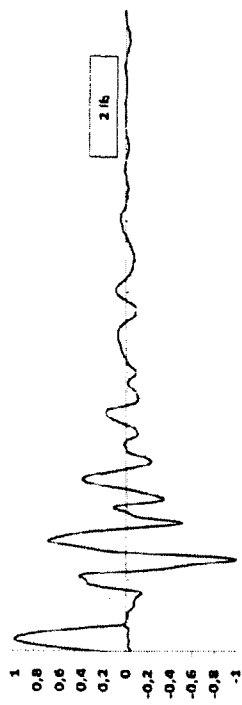


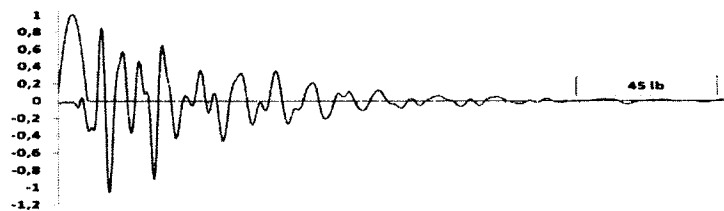
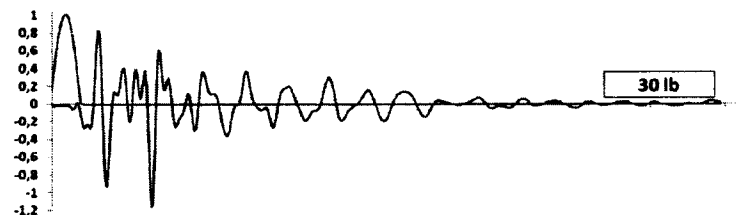
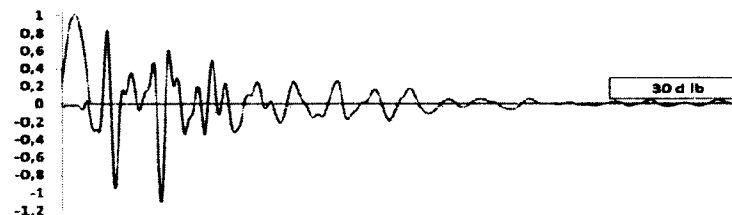
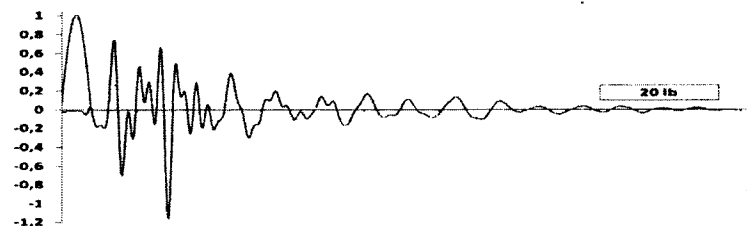
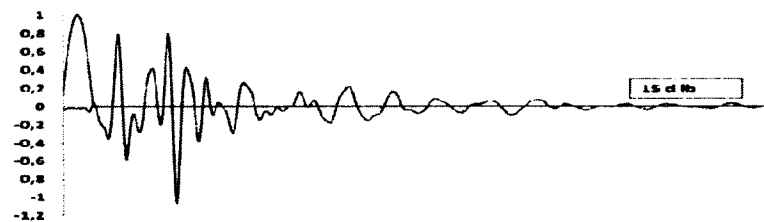
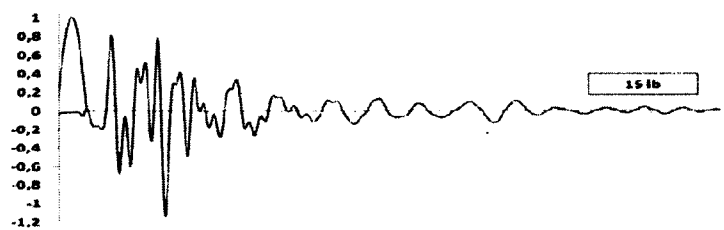


ent
z

largement
00 KHz

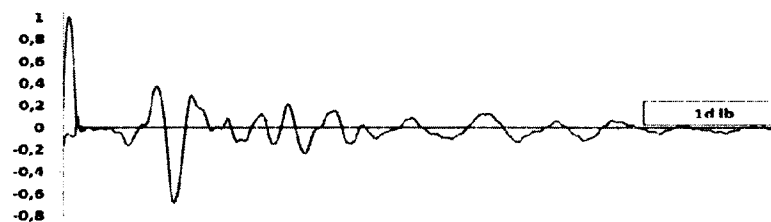
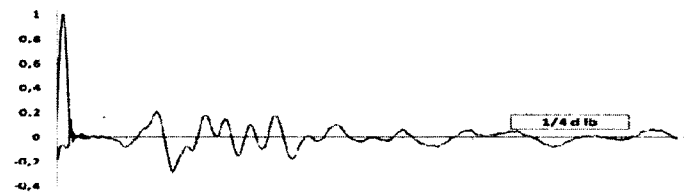
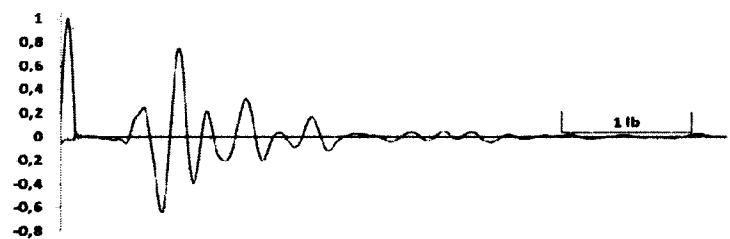
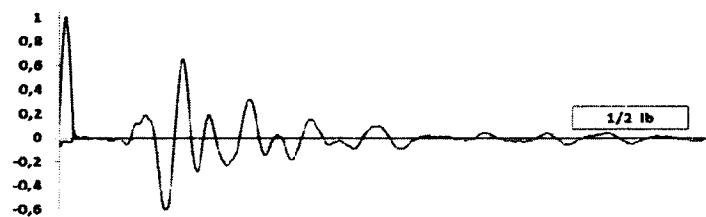
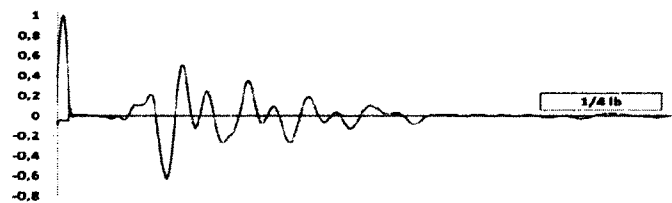
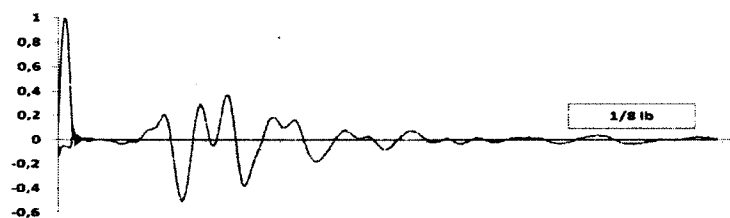


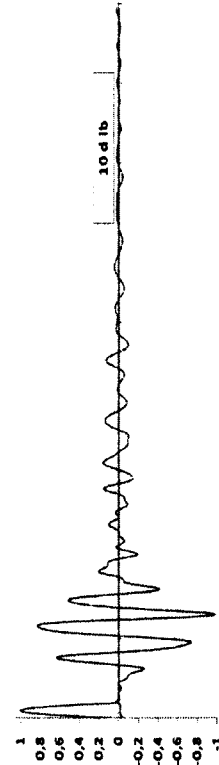
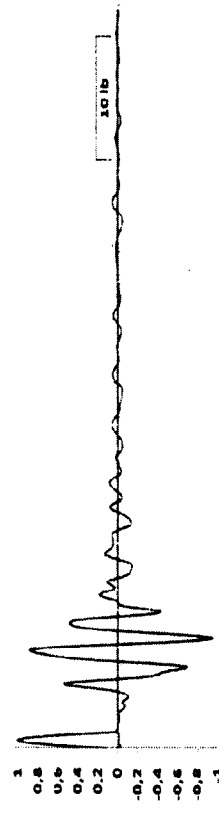
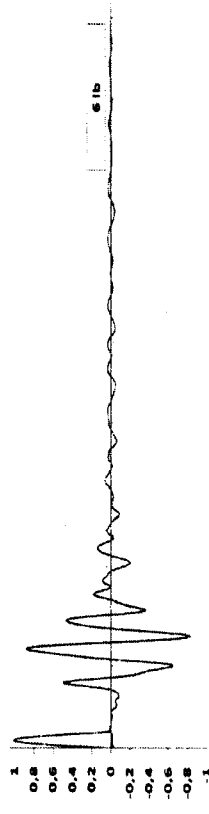
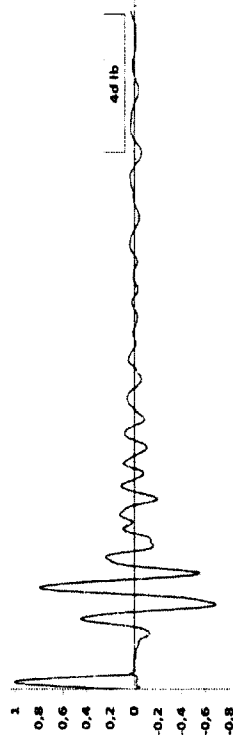
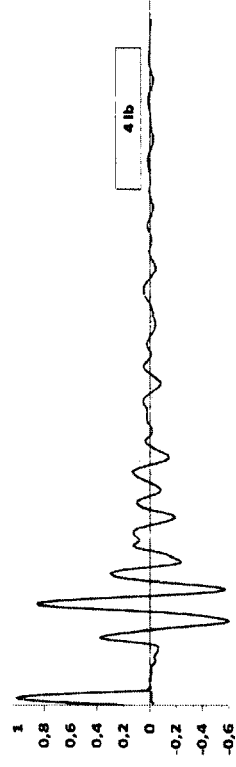
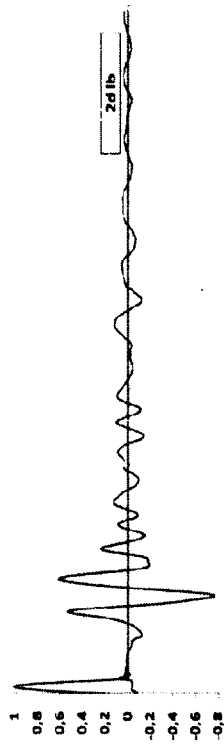
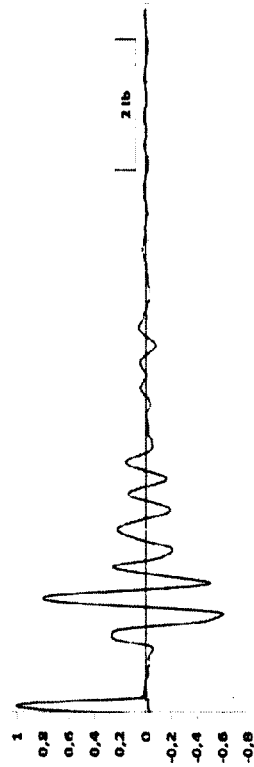


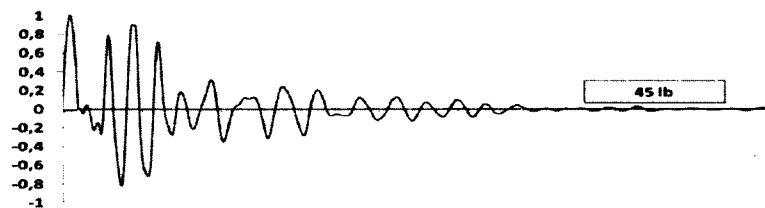
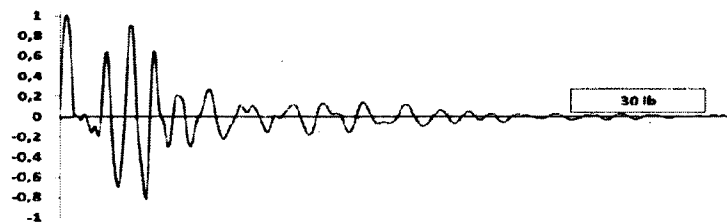
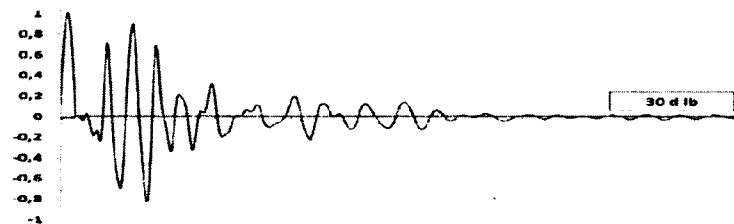
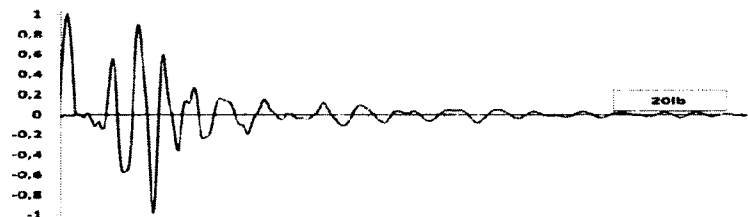
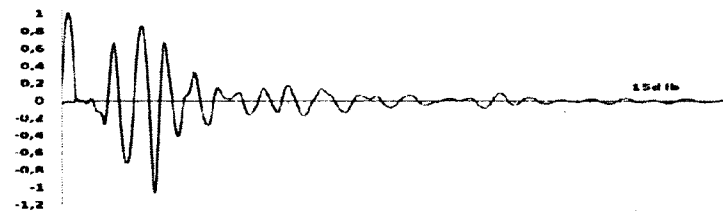
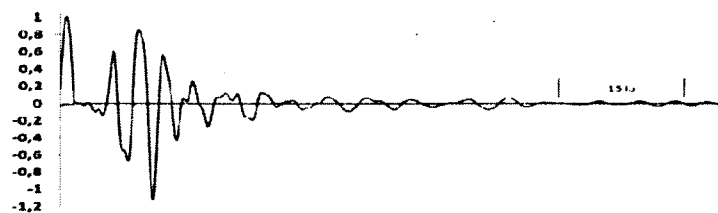


ent

argement
Hz

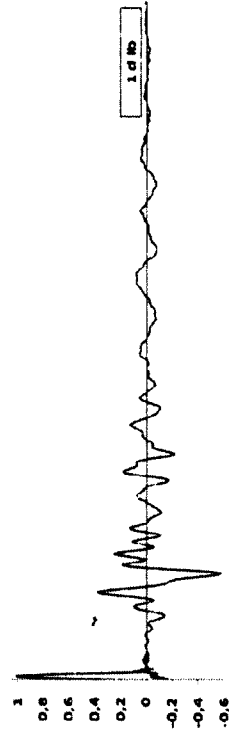
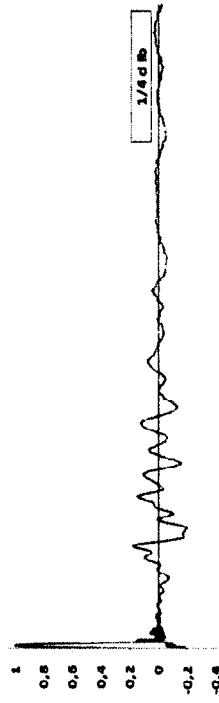
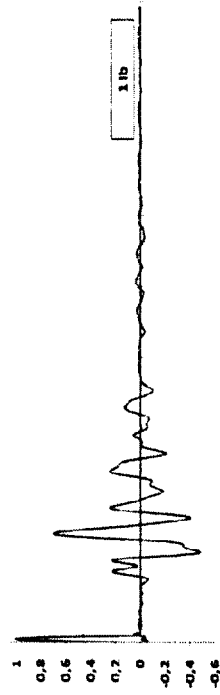
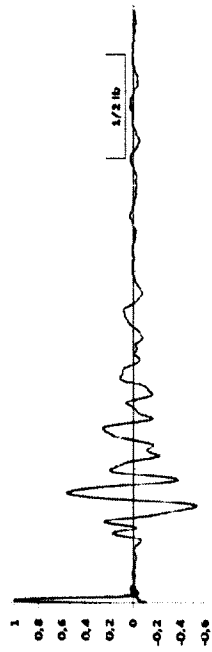
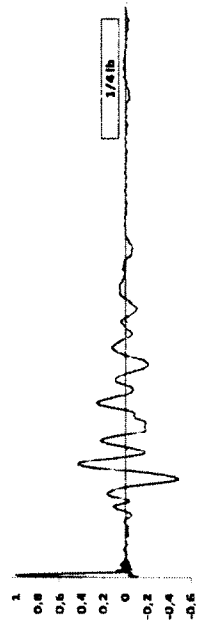
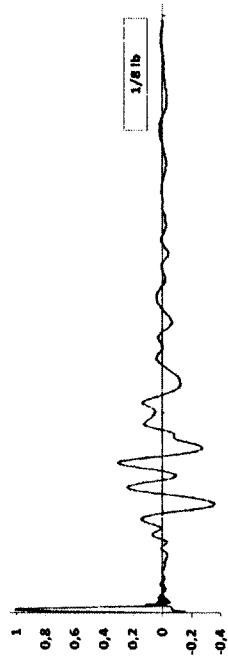


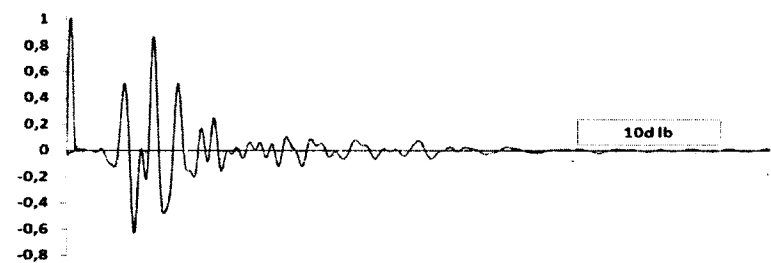
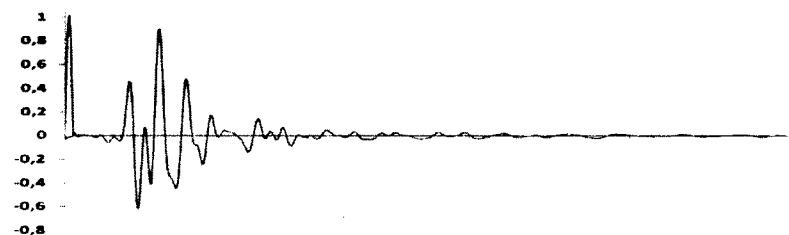
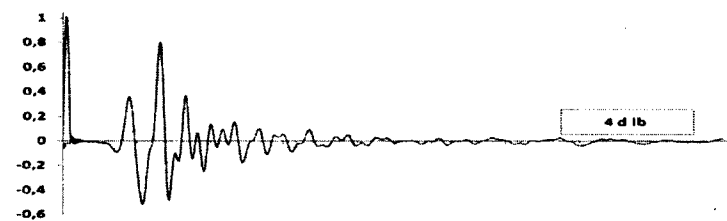
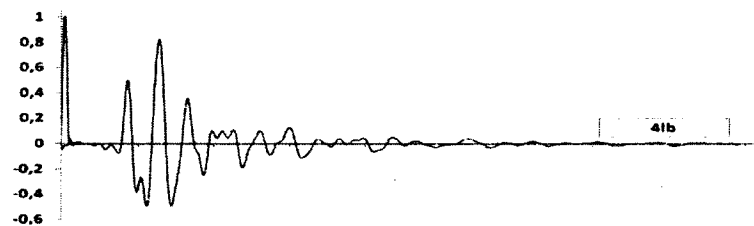
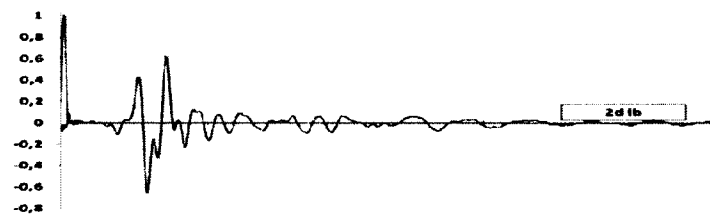
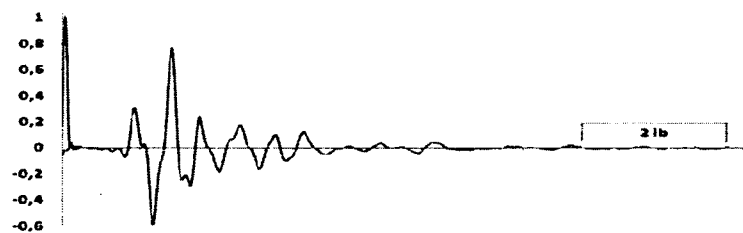


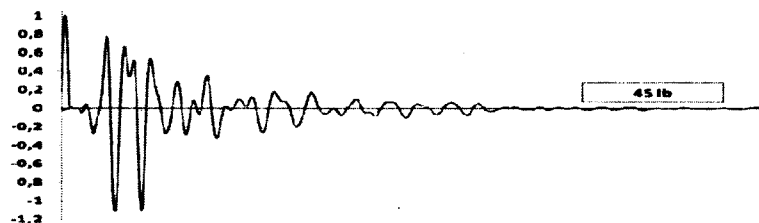
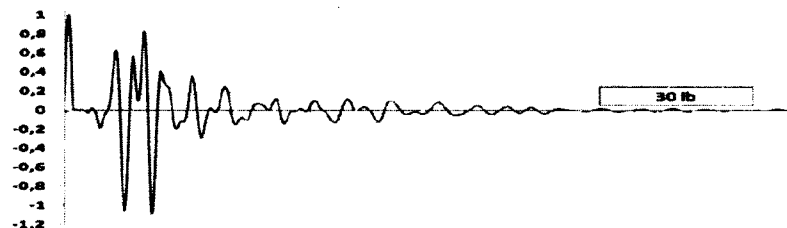
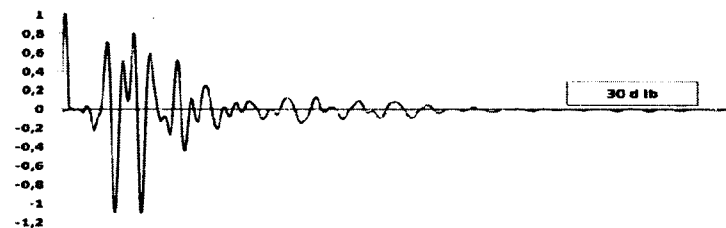
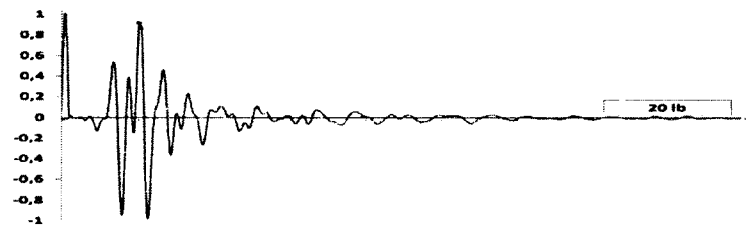
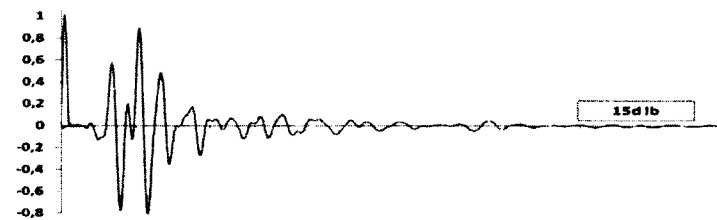
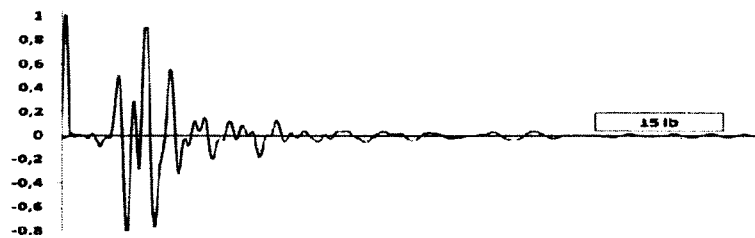


ment

chargement
Hz

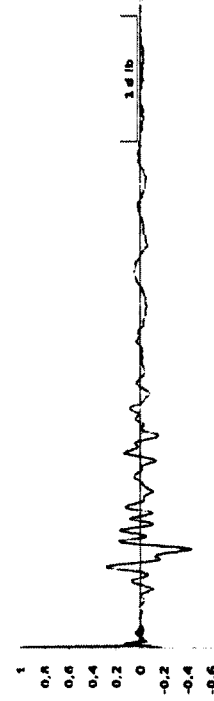
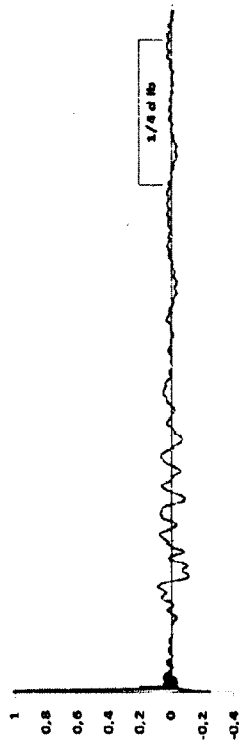
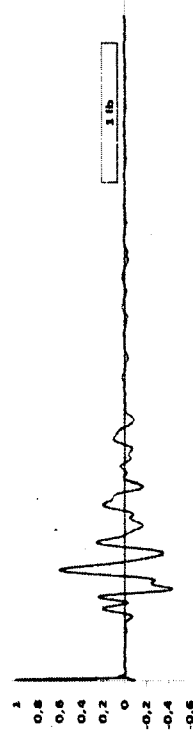
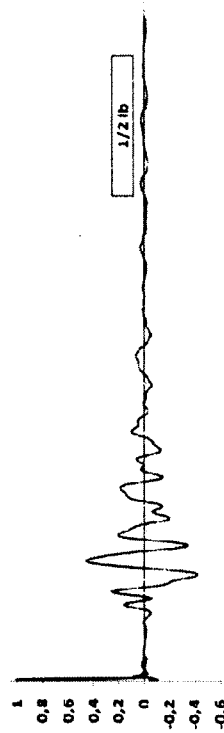
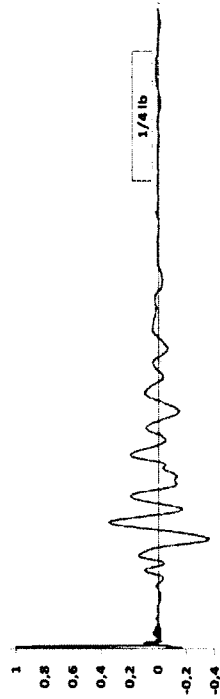
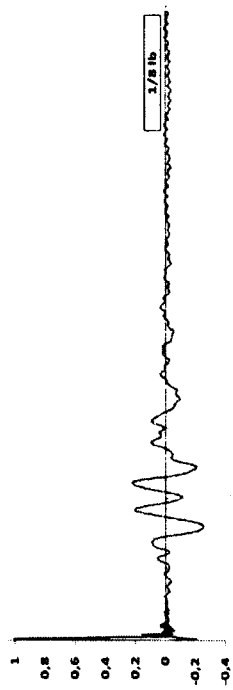


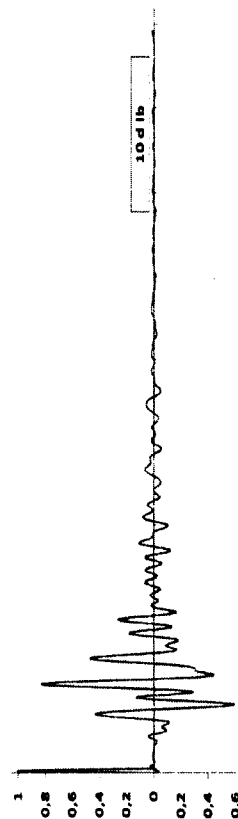
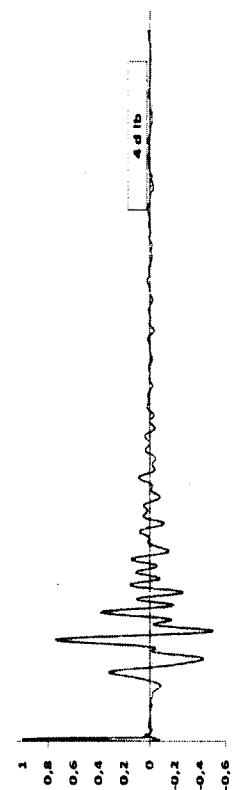
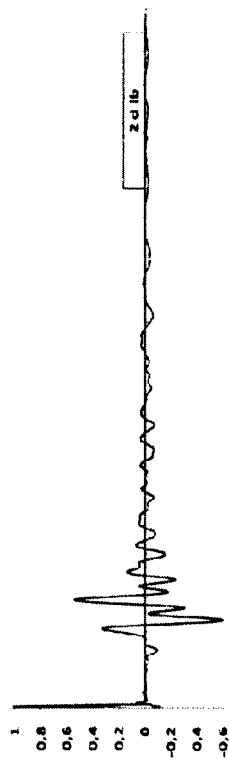
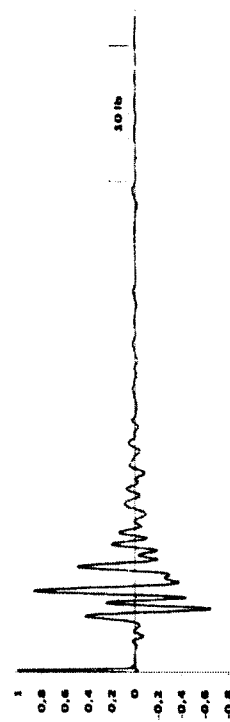
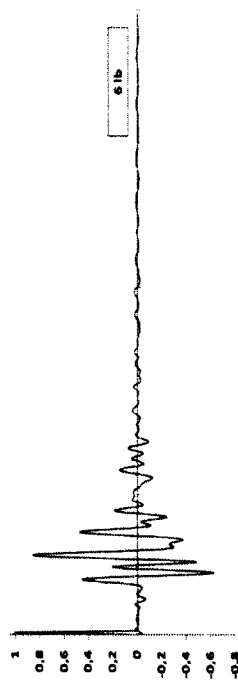
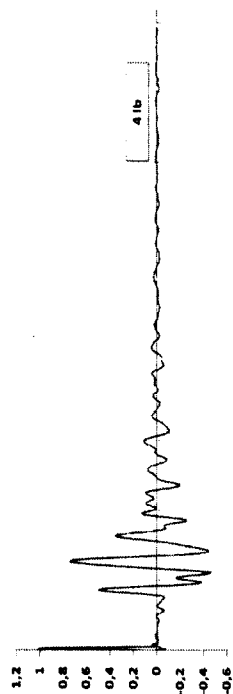
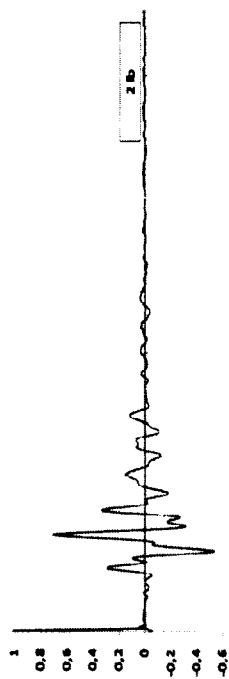


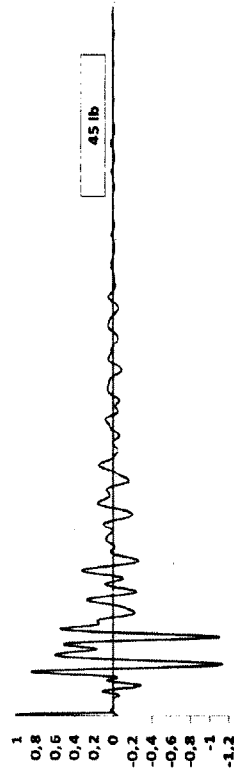
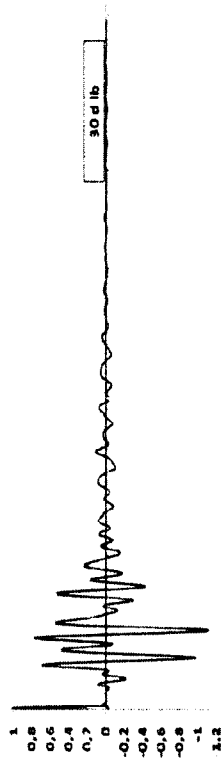
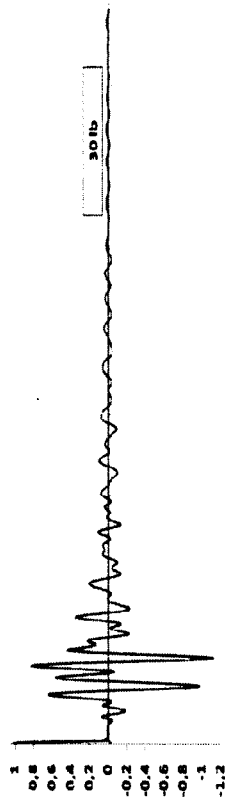
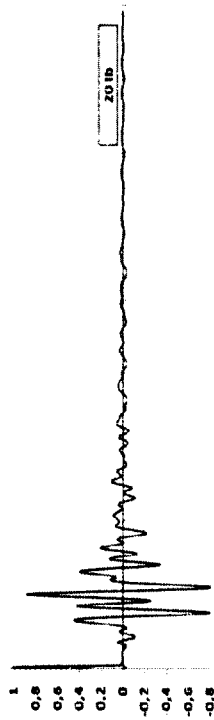
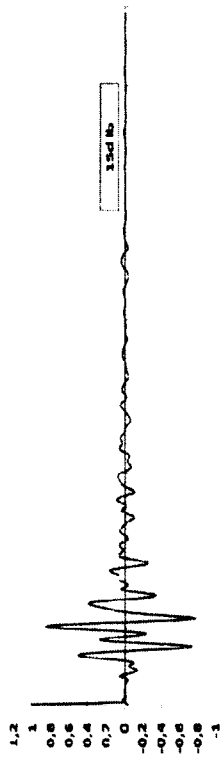
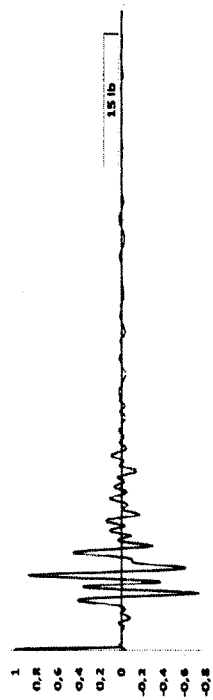


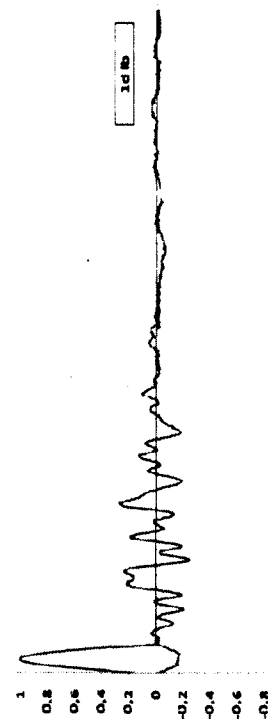
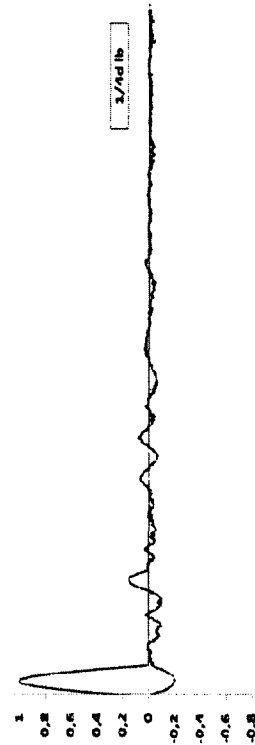
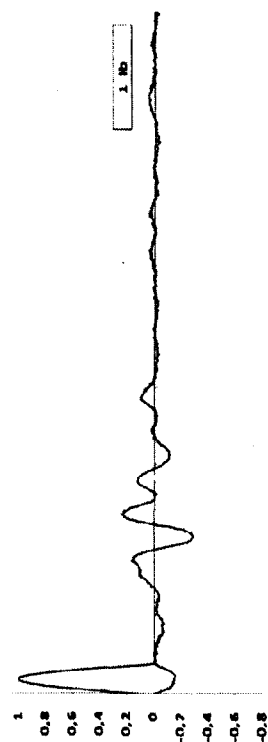
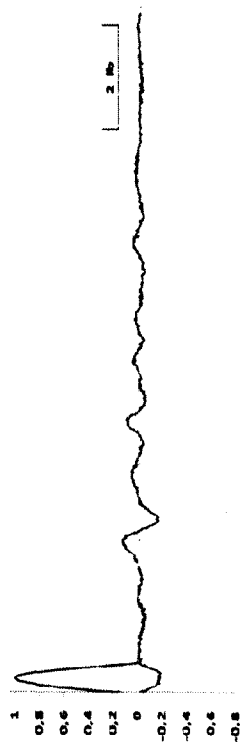
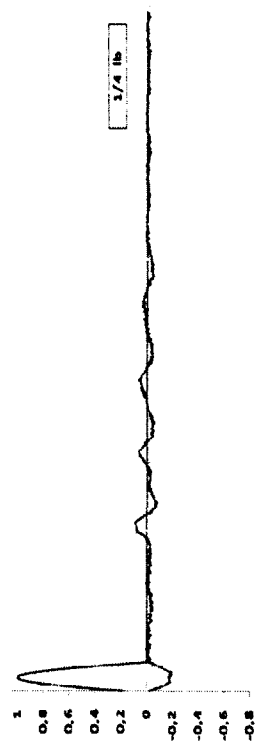
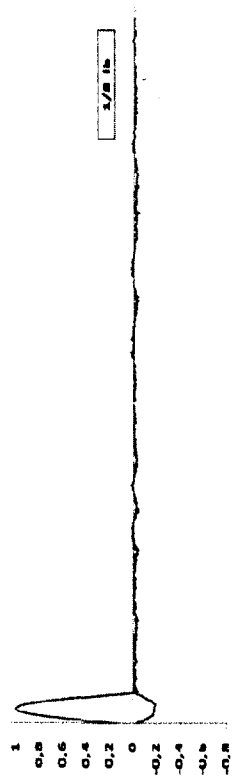
ement

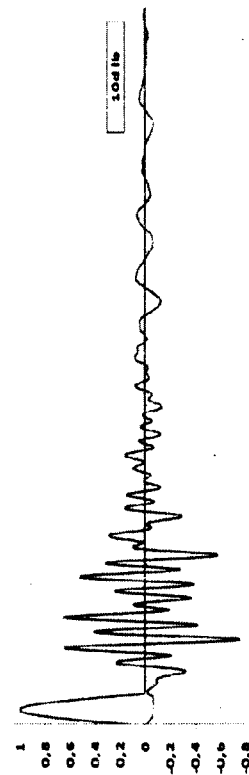
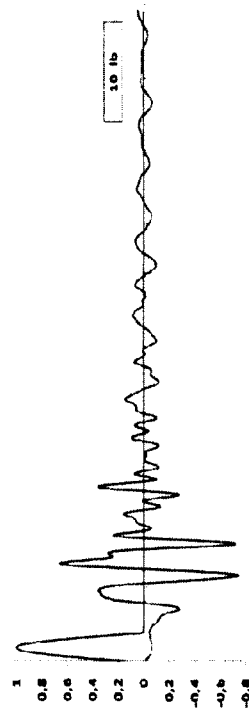
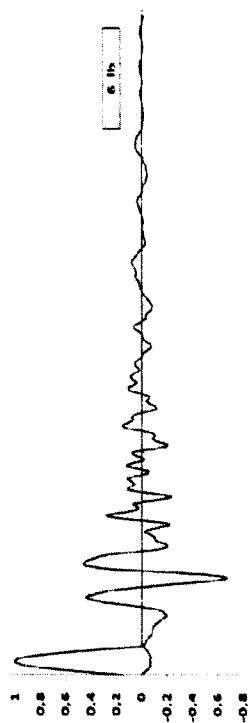
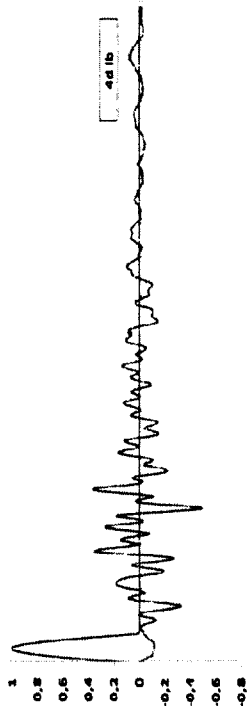
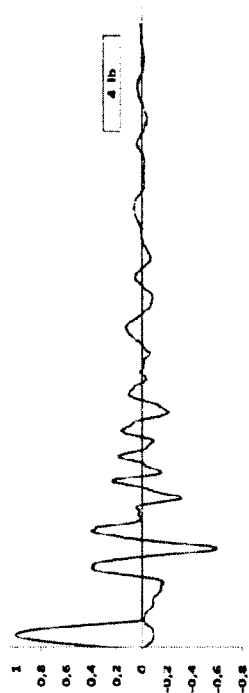
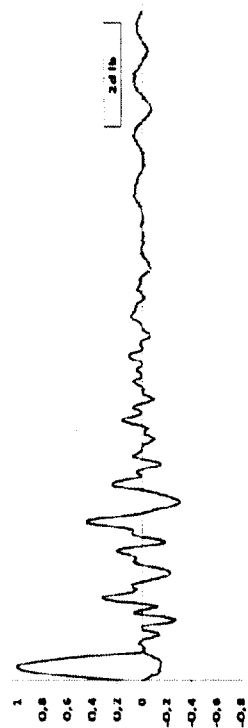
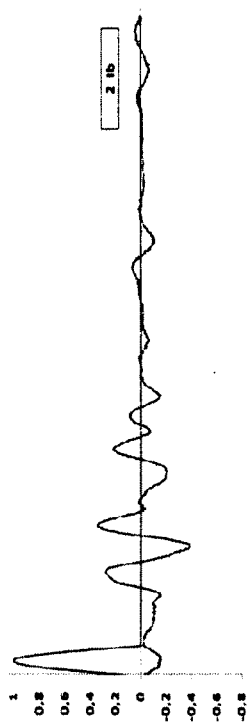
argement
[z

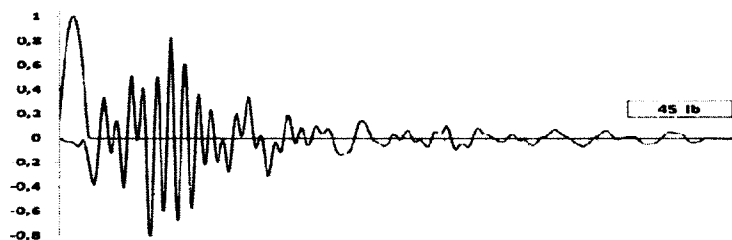
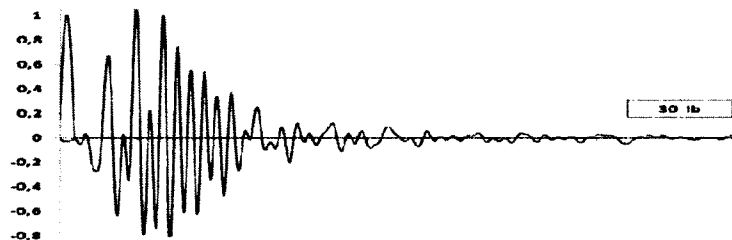
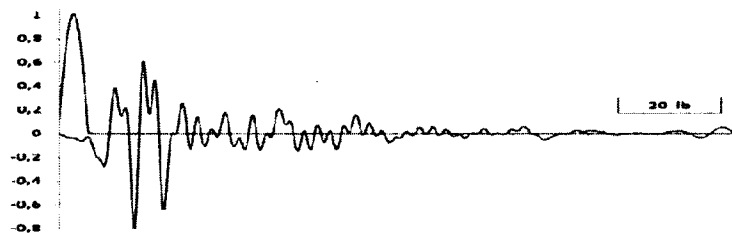
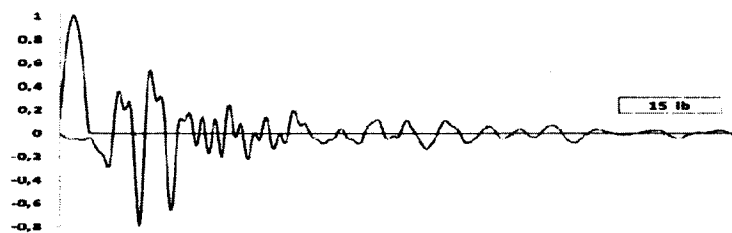




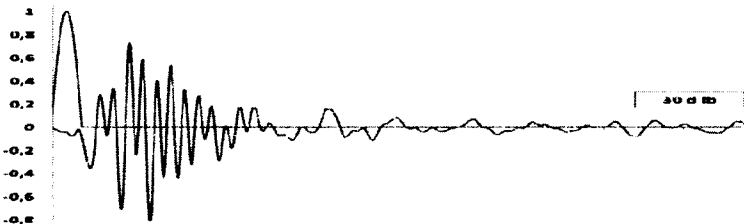
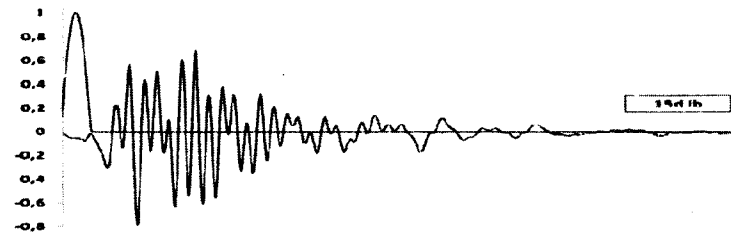




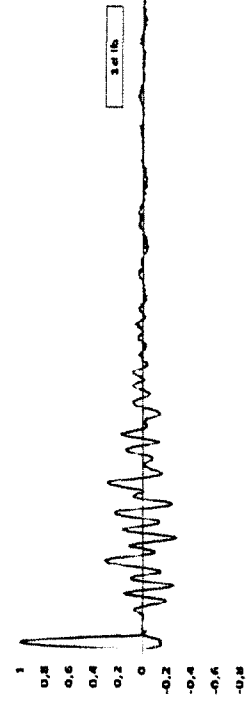
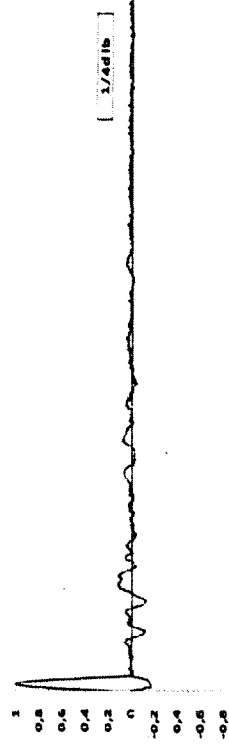
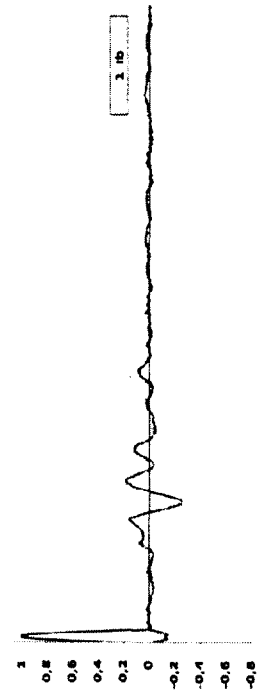
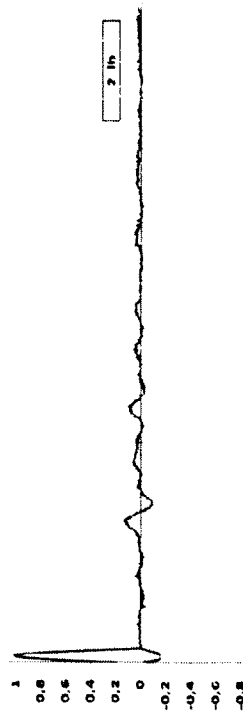
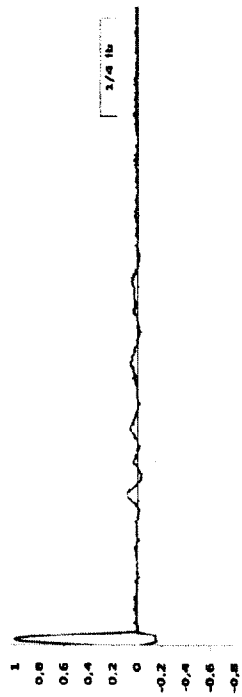
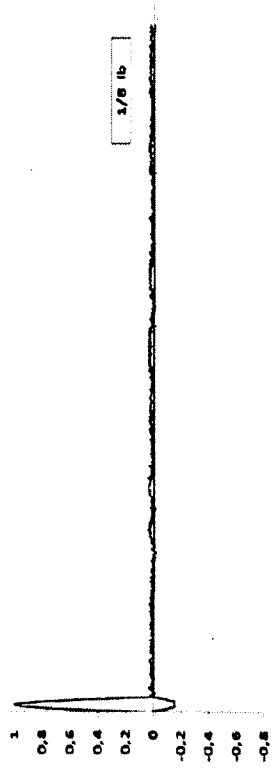


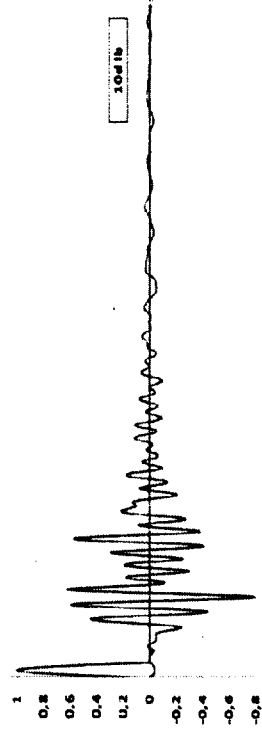
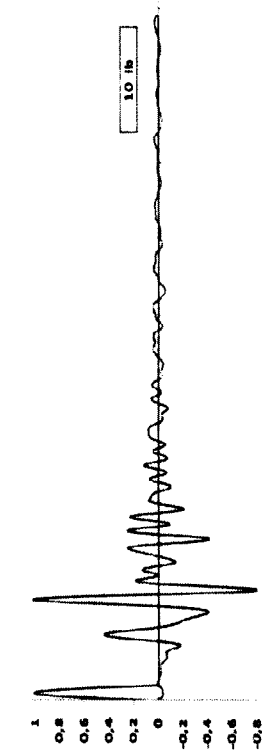
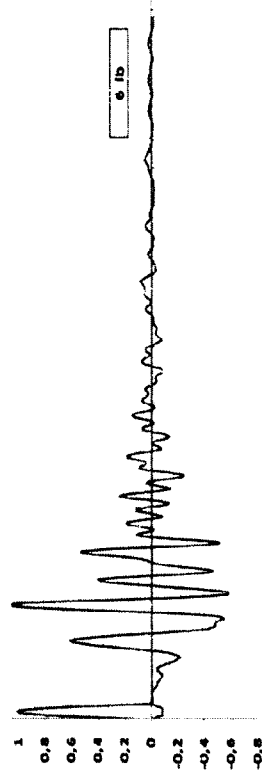
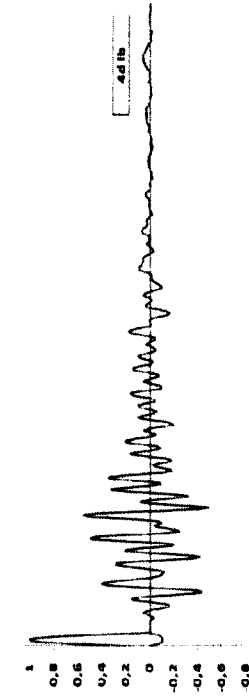
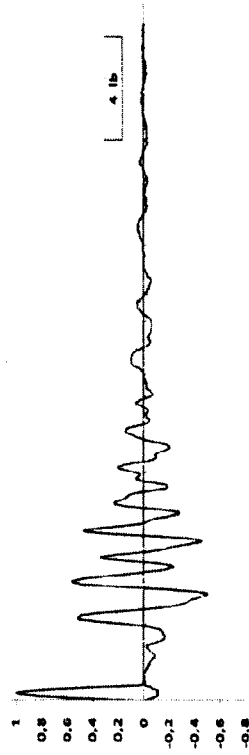
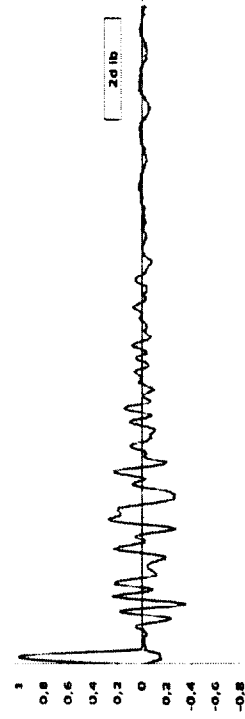
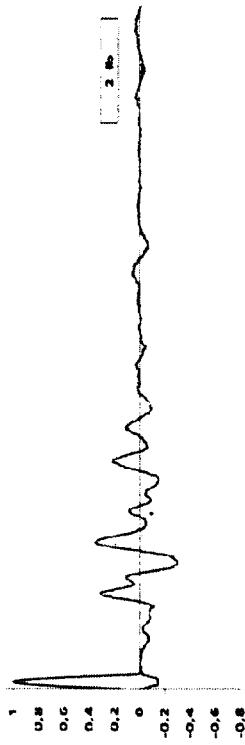


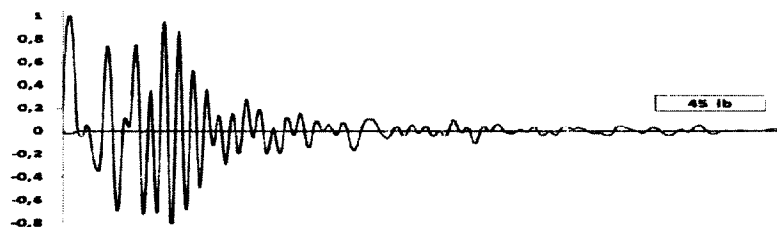
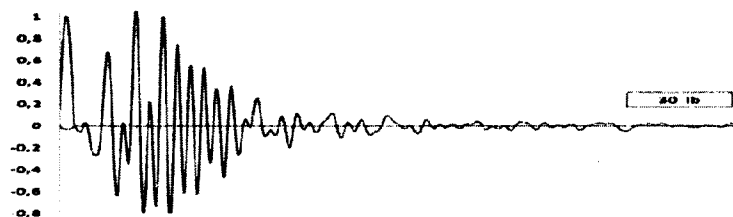
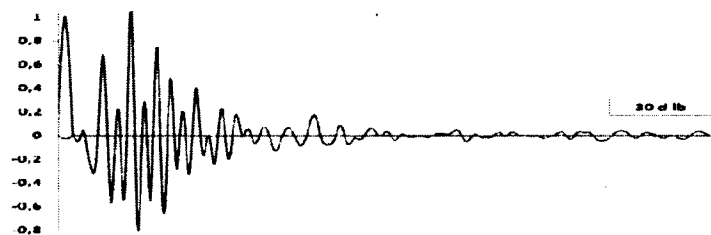
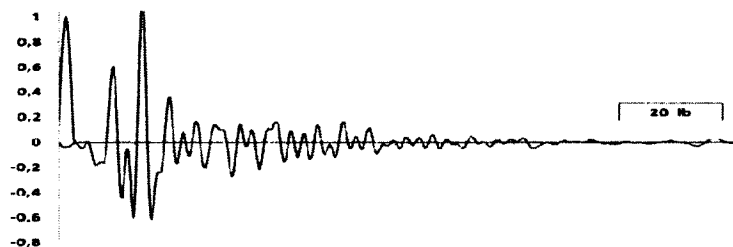
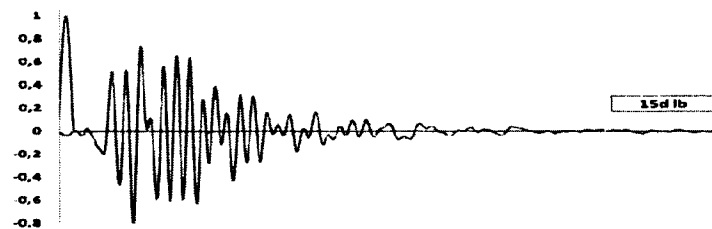
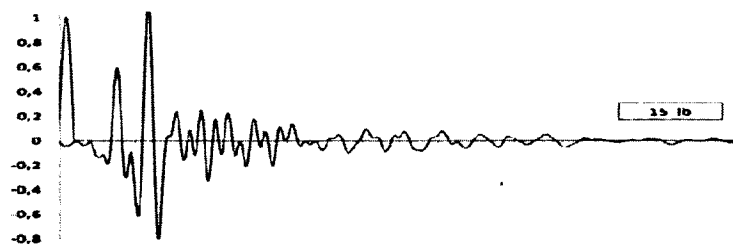
it



Déchargement
2,5 KHz

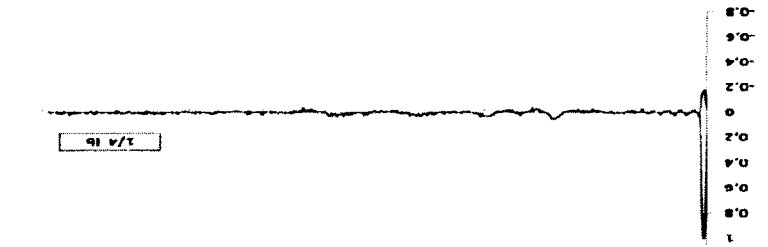
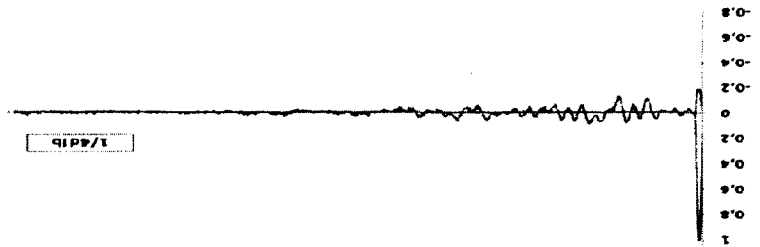
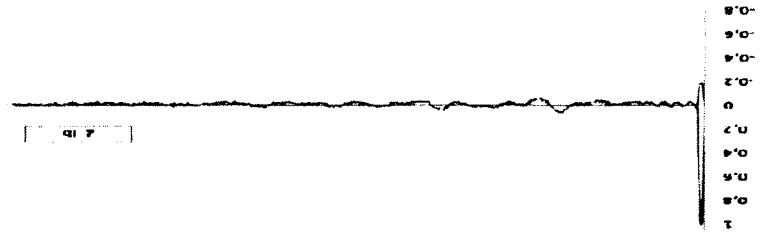
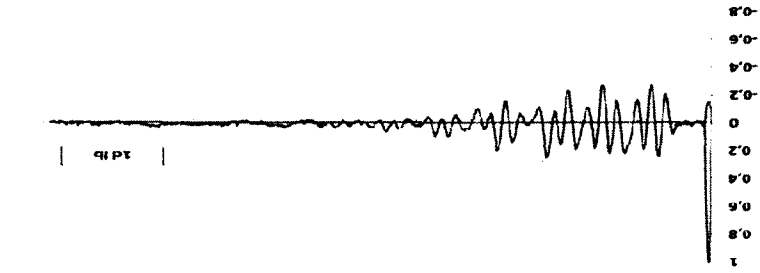


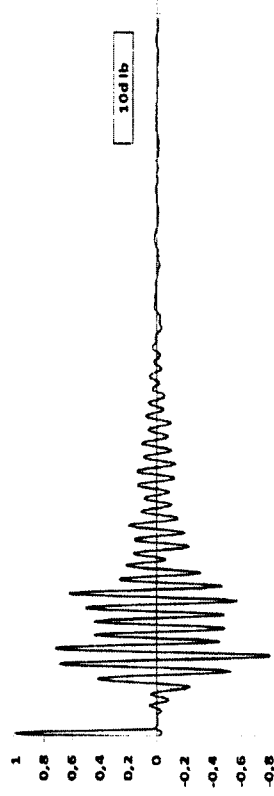
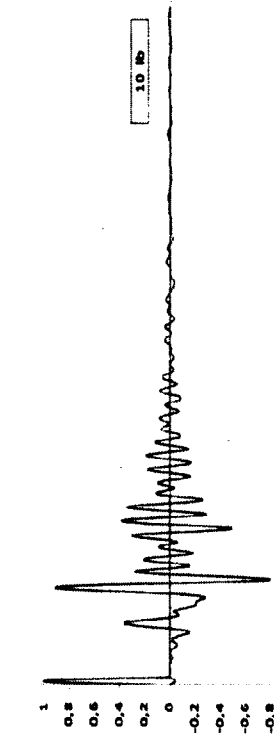
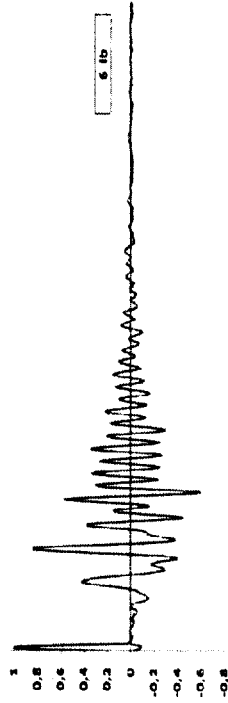
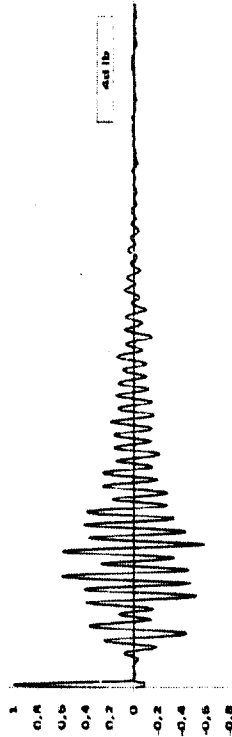
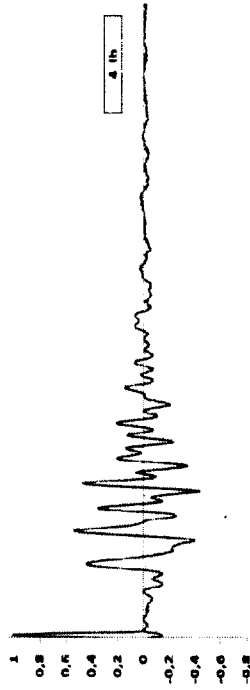
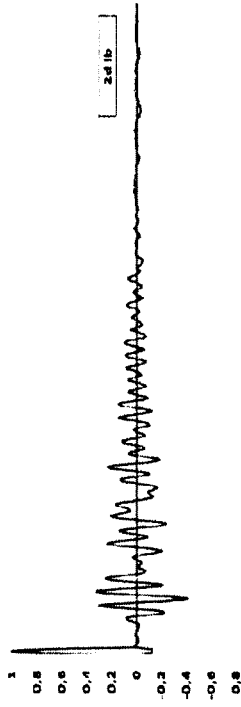
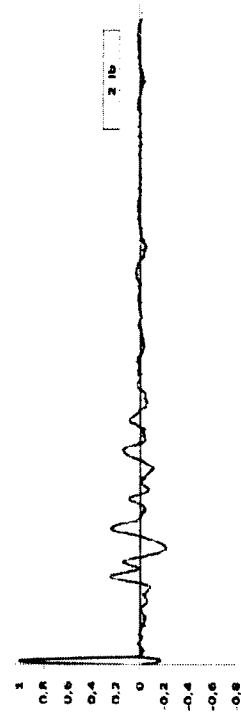


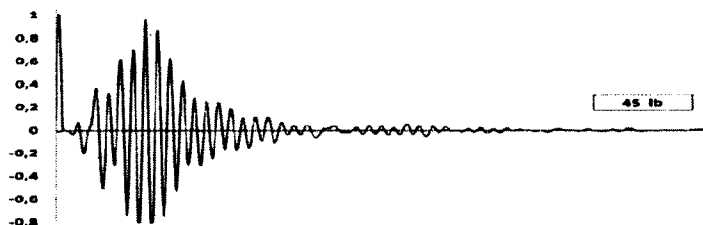
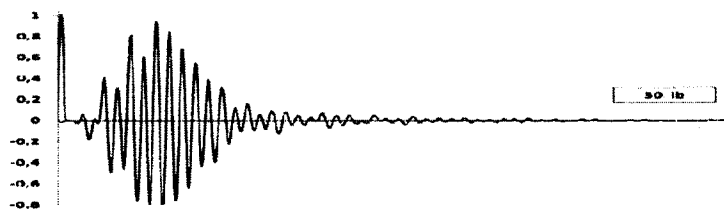
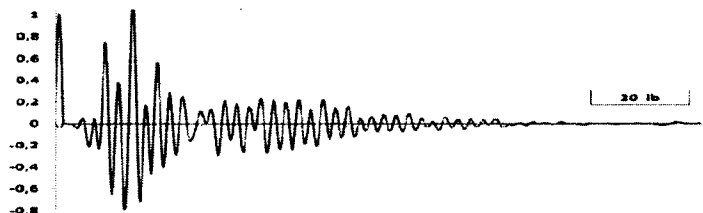
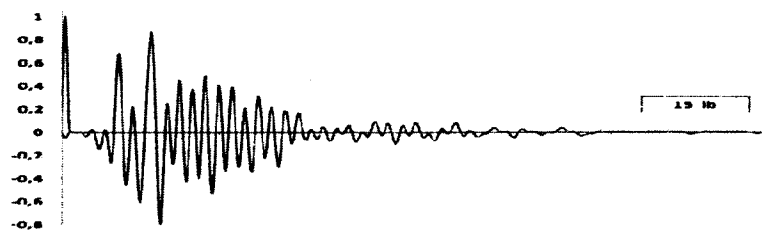


ent

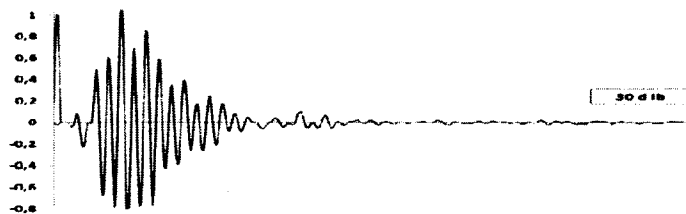
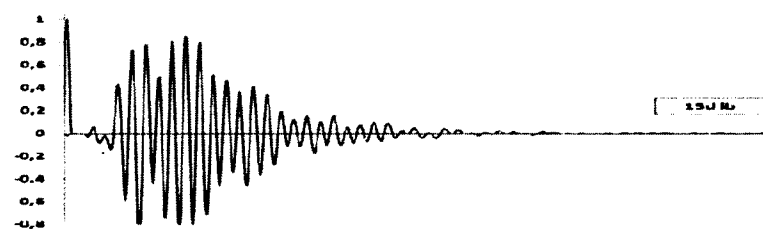
2. Déchargement
le 25 KHz



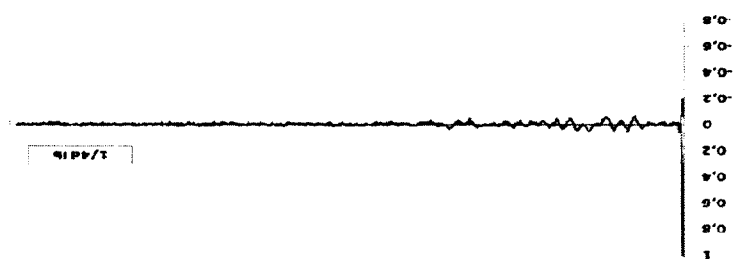
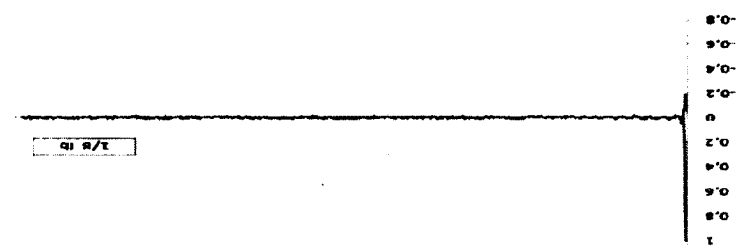
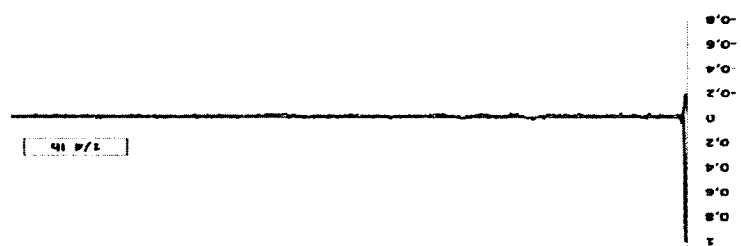
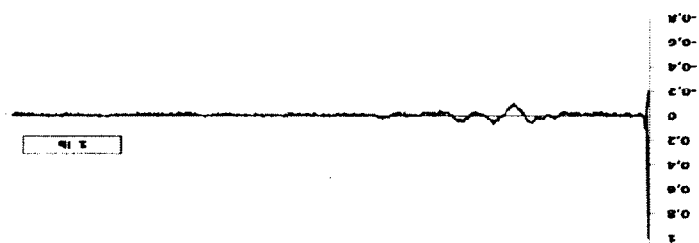
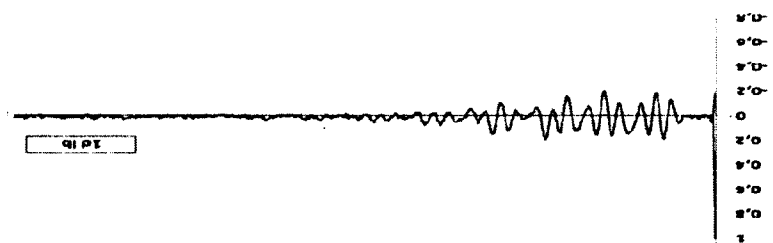


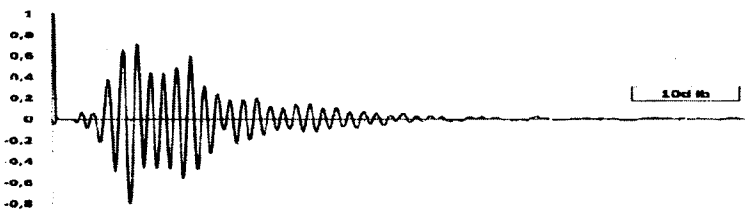
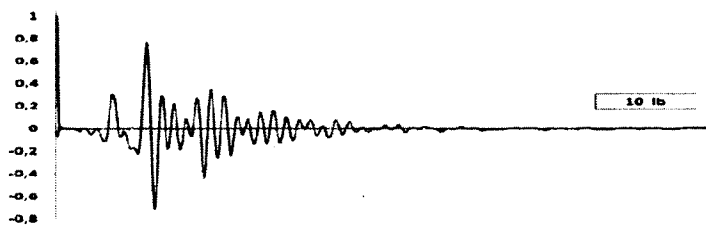
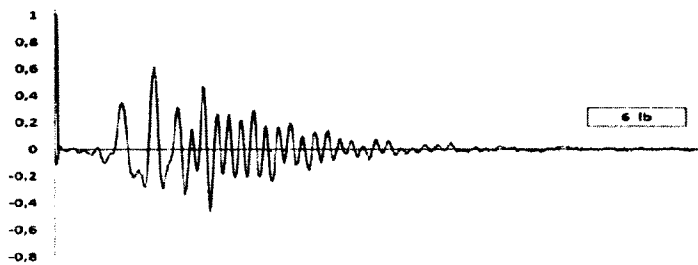
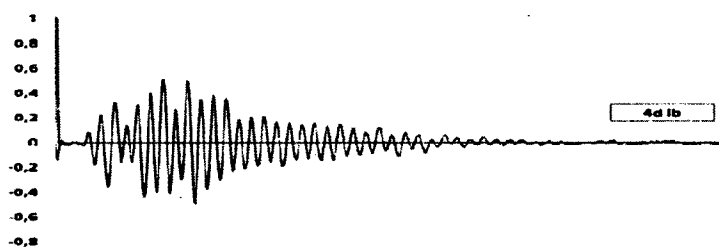
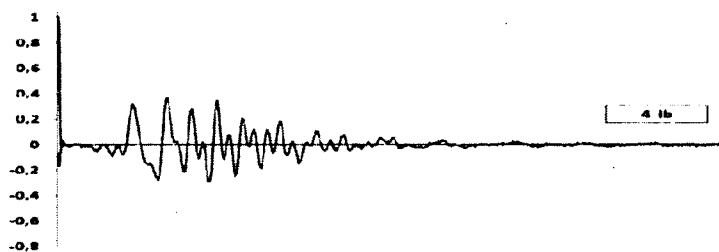
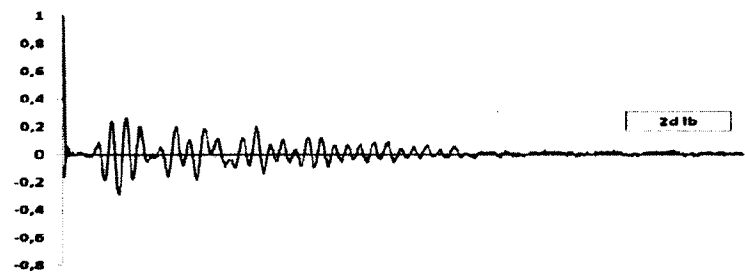
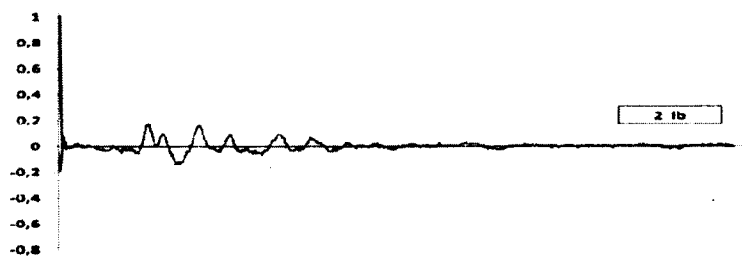


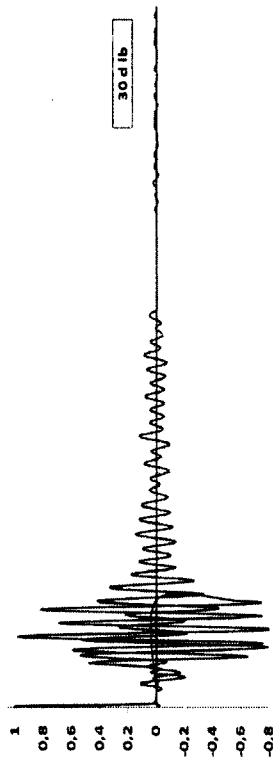
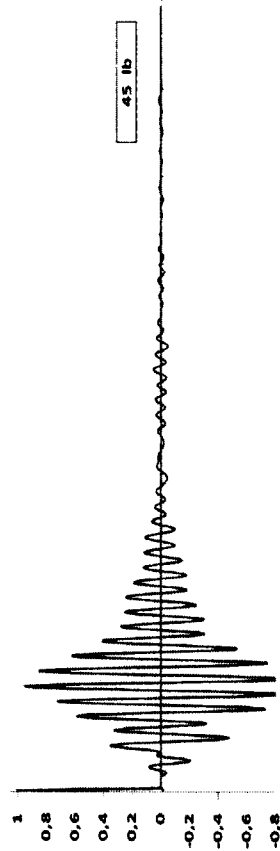
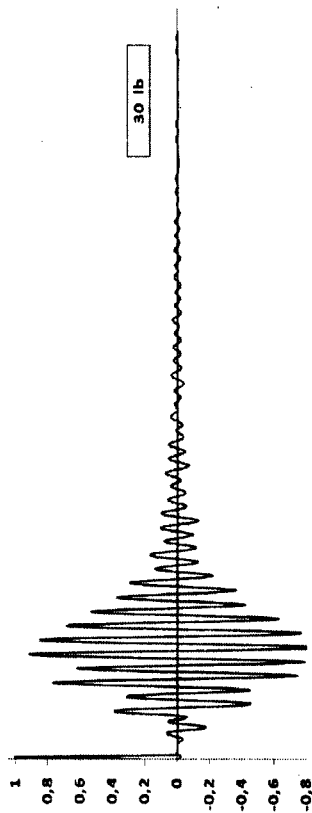
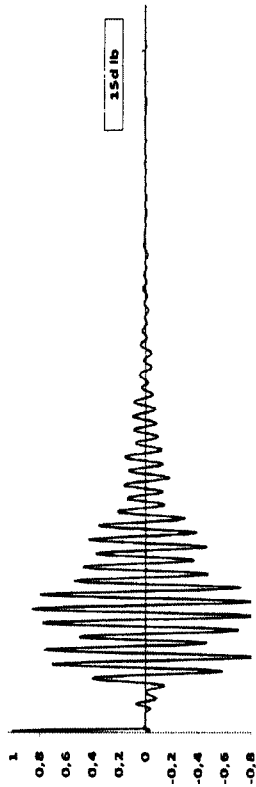
t



déchargement
50 KHz







it

déchargement
00 KHz

